

Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Sledování elektrického odporu odporové vrstvy
inteligentního nástroje
Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools

Student:

Adam Křiva

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Křiva**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje
Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Zpracování naměřených hodnot.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.

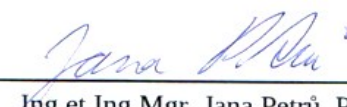
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně od vedením vedoucího práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2014

..... 

podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 19.5.2014

..... Adam Křiva
podpis studenta

Poděkování

Velmi rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace, připomínky spojené s vypracováním a za trpělivost během řešení mého úkolu

Dále bych taky rád poděkoval své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia, a kolegům při společném měření, kteří mi poskytli potřebné informace.

Anotace diplomové práce

KŘIVA, A. *Sledování elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje*. Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2014, 53s. Bakalářská práce.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph. D.

Bakalářská práce se zabývá sledováním elektrického odporu odporové vrstvy inteligentního nástroje. Problematika byla provedena na vyměnitelné břitové destičce z řezné keramiky.

V úvodu je seznámení s problematikou řezné keramiky, použitým obráběným materiálem, opotřebení nástroje, trvanlivosti, životnosti a elektrického odporu. Hlavní část se zabývá vyhodnocením experimentu s grafickým zpracováním naměřených výsledků. V závěru je shrnutí daného úkolu.

Cílem práce je zjistit chování opotřebení odporové vrstvy na povrchu inteligentního nástroje na předem daném materiálu.

Annotation of thesis

KŘIVA, A. *Monitoring Electrical Resistance of Resistor Layer of Intelligent Tools*. Department of Working and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2014, 53p. Bachelor thesis. Supervisor is: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph. D.

The bachelor thesis deals with monitoring the electrical resistance of the resistive layer intelligent tool. The issue was made on the indexable cutting plate from ceramics.

The introduction is familiar with the problem of cutting ceramics, used workpiece material, tool wear, durability, longevity and electrical resistance. The main part deals with the evaluation experiment with graphic processing of the measurement results. At the end is a summary of the task.

The aim is to examine the behavior of the wear resistance layer on the surface of an intelligent tool to advance the material.

Obsah

Seznam použitého označení	9
Úvod	11
1. Řezná keramika.....	12
1.1. Směsná oxidová keramika (Oxid hlinitý – Al_2O_3).....	12
1.2. Polosměsná oxidová keramika (Oxid zirkoničitý – ZrO_2)	12
1.3. Nitridová keramika (Nitrid křemíku - Si_3N_4)	13
1.4. Historie řezné keramiky	13
1.5. Výroba řezné keramiky.....	13
2. Soustružnické nože s mechanicky upínanou destičkou	14
3. Litina	15
3.1. Šedá litina (s lupínkovým grafitem)	15
3.2. Tvárná litina (s kuličkovým grafitem)	15
3.3. Bílá litina (vznik karbidu železa).....	15
3.4. Temperovaná litina (s vločkovým grafitem)	16
4. Opotřebení nástrojů	16
4.1. Druhy opotřebení.....	17
4.2. Druhy měření opotřebení	21
4.2.1. Přímé metody měření opotřebení.....	21
4.2.2. Nepřímé metody měření opotřebení.....	22
5. Trvanlivost, životnost a řezivost nástroje	22
5.1. Trvanlivost	22
5.2. Životnost.....	23
5.3. Řezivost nástroje	23
6. Elektrický odpor (rezistance).....	24
7. Rozbor experimentálního měření	25
7.1. Materiál použitý při obrábění	26
7.2. Stroj.....	27
7.3. Nástroj.....	28
7.4. Použitá pomocná zařízení.....	29
8. Vyhodnocení experimentu	30
8.1. První měření břitem č. 7.....	30
8.2. Druhé měření břitem č. 1	33
8.3. Třetí měření břitem č. 2.....	35
8.4. Čtvrté měření břitem č. 3	37

8.5.	Páté měření břitem č. 4	39
8.6.	Šesté měření břitem č. 5	42
8.7.	Sedmé měření břitem č. 6 – náhrada za 3. měření	44
8.8.	Osmé měření – zkouškový pokus č. 1.....	47
8.9.	Deváté měření – zkouškový pokus č. 2.....	49
9.	Závěr.....	51
10.	Seznam použité literatury	52

Seznam použitého označení

A	[%]	tažnost
Al ₂ O ₃	[-]	oxid hlinitý
a _p	[mm]	hloubka řezu
d	[mm]	malý průměr
D	[mm]	velký průměr
f	[mm]	posuv na otáčku
Fe-Fe ₃ C	[-]	binární diagram železo-uhlík metastabilní soustavy
G	[S]	elektrická vodivost
HB	[-]	značka tvrdosti podle Brinella
I	[A]	elektrický proud
KT	[mm]	hloubka žlábků opotřebení čela
l	[mm]	délka soustružení
L	[mm]	vzdálenost od čela soustružení
l ₀	[m]	délka vodiče
n	[1/min]	počet otáček
R	[Ω]	elektrický odpor
R _m	[MPa]	Pevnost v tahu
R _{p02}	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[m ²]	průřez vodiče
Si ₃ N ₄	[-]	nitrid křemíku
SiC	[-]	karbid křemíku
SiO ₂	[-]	oxid křemičitý
T	[°C]	teplota
t	[s]	čas
TiC	[-]	karbid titanu
U	[V]	elektrické napětí

VB	[mm]	opotřebení na hřbetu destičky
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
v_c	[m/min]	řezná rychlost
ZrO ₂	[-]	oxid zirkoničitý
γ	[S/m]	měrná elektrická vodivost
ρ	[$\Omega \cdot m$]	měrný elektrický odpor materiálu

Úvod

V této době, kde se strojírenské výrobní firmy snaží o nejlepší kvalitu, dokonalost, rychlost výroby a dostupnost svého zboží na trhu, se musí klást větší důraz na kvalitu strojů a nástrojů, jimiž se výrobky vyrábějí. Proto vznikají nové dokonalejší technologie, které umožňují zrychlení výroby a jsou ekologicky nenáročné.

Nové technologie ale také sebou nesou různé nové problematické aspekty, proto je nutné jejich funkci monitorovat a sledovat.

Úlohou této bakalářské práce je seznámit čtenáře s novým způsobem zjišťováním opotřebení břitové destičky vyrobené z řezné keramiky. Řezná keramika je materiál vyrobený práškovou metalurgií. Jedná se o velice tvrdý materiál, který je náchylný na lámavost. Zkoušel se nový druh nitridické řezné keramiky, kde je na destičku nanesena odporová vrstva sledující elektrický odpor v záběru destičky. Tento typ destičky nebyl ještě zcela vyzkoušen na všech druzích materiálu, proto bylo nutné zjistit její chování pomocí experimentu.

Sledovala se trvanlivost, životnost a opotřebení řezné destičky na určitém obráběném materiálu. Destička byla upnuta do speciálního držáku nože pro vyměnitelné břitové destičky.

Minulé ročníky bakalářských prací se už touto tematikou zabývaly, ale experimenty prováděli na jiných typech materiálu. V tomto experimentu byl použit materiál z tvárné litiny s kuličkovým grafitem.

Ze začátku této bakalářské práce jsou popsány teoretické části, které následně navazují na rozbor a průběh experimentu.

1. Řezná keramika

Keramika je krystalický materiál, jehož hlavní složku tvoří anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje tradiční keramiku (cement, porcelán, cihly), řezné a broušící materiály a tzv. "nové" keramické látky (konstrukční, strojírenské, průmyslové). Nová keramika je z čistých surovin syntetická. Většina látek zařazovaných pod pojem "nová keramika" jsou látky krystalické na rozdíl od tradiční keramiky (např. porcelán, glazury), která obsahuje i značný podíl skelné (amorfni) fáze [1].

Keramické látky jsou vázány meziatomovými iontovými a kovalentními vazbami. Nikdy však vazba není čistě iontová nebo čistě kovalentní (obvykle se vyskytují oba typy vazby současně). V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální.

Polykrystalické keramické materiály mají vysokou tvrdost, nízká houževnatost (důvod zvýšené křehkosti), malý rozměr zrna (velmi často pod 1 μm) a nízkou měrnou hmotnost.

Keramické materiály, využívané pro výrobu vyměnitelných břitových destiček řezných nástrojů, jsou obvykle rozdělovány následovně:

1.1. Směsná oxidová keramika (Oxid hlinitý – Al_2O_3)

Nejstarší keramický materiál, má nízkou houževnatost a odolnost proti teplotnímu rázu. Naopak má vysokou odolnost proti opotřebení a odolnost proti teplotnímu rázu. Je to bílá krystalická keramika, která vzniká při spalování hliníku nebo dehydratací hydroxidu hlinitého. Vyrábí se dvěma způsoby. Bayrovou metodou, která dosáhne 99,9% čistoty produktu. Druhý způsob výroby je pomocí termického rozkladu kamene, kdy se dosahuje 99,98% čistoty produktu. Jedná se o několikanásobnou rekrytalizaci kamence před tepelným rozkladem. Dosahuje se velmi jemných primárních částic [2].

1.2. Polosměsná oxidová keramika (Oxid zirkoničitý – ZrO_2)

Je tvořena oxidem zirkoničitým. Na rozdíl od směsné oxidové keramiky má pouze 50% tvrdost, ale zase má výrazně vyšší ohybovou pevnost a houževnatost. Tato keramika je rozdělena do třech krystalových forem (monolitická, tetragonální a kubická) a výroba může být provedena chlorací, alkalickým tavením, plazmovým hořákem, atd.

1.3. Nitridová keramika (Nitrid křemíku - Si_3N_4)

Je založena na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 . Je to sloučenina, vyskytující se ve dvou modifikacích (nizkoteplotní a vysokoteplotní). Tyto modifikace se od sebe liší pořadím vrstev Si-N při jejich skládání [2]. Oproti směsné oxidové keramice má vyšší lomovou houževnatost, tepelnou vodivost a lepší odolnost proti tepelným rázům. Kvůli menší chemické stabilitě není vhodná pro obrábění ocelí. Vyrábí se slinováním při teplotách 1600-1800°C v dusíkové atmosféře o tlaku 1-10MPa.

1.4. Historie řezné keramiky

První známky použití SiO_2 bylo již v době kamenné k ostření nožů a nástrojů. Takovéto pískovcové bloky byly po delší dobu brány jako nejlepší volba při broušení nástrojů.

O prvních pokusech s řeznou keramikou byla zmínka ve 20. letech minulého století, kdy první nástroj na bázi Al_2O_3 vymyslela za II. světové války německá firma Degussa jako pokus za náhradu slinutých karbidů [1].

Začátkem 70. let se vyvíjely keramiky $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, které zvýšily odolnost proti vydrolování.

Na počátku 80. let se na trh dostaly keramické nástroje na bázi Si_3N_4 . A v polovině 80. let byly vyvinuty kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny SiC neboli whiskery [1].

1.5. Výroba řezné keramiky

Při výrobě je potřeba získat oxid hlinitý (Al_2O_3) v čisté a jemnozrnné podobě. Pro ulehčení slinování a zamezení růstu zrna se přidávají pomocné látky typu oxid zirkonia, chromu, titanu, kobaltu, molybdenu a karbidy wolframu.

Po mokrému semletí se prášek vysuší a lisuje v automatických lisech na požadované tvary. Před lisováním se do směsi přimíchávají přísady snižující tření při lisování, zlepšující zaplnění tečení prášků a zlepšení zaplnění formy. Lisování keramiky probíhá na lisech s oboustranným tlakem.

Řezné keramické materiály se dají také vyrábět izostatickým lisováním, vstřikovacím lisováním a litím. [2]

2. Soustružnické nože s mechanicky upínanou destičkou

Mechanické upínání břitů je v dnešní době velice rozšířené. Využití nachází u soustružnických nožů, fréz, frézovacích hlav, vyvrtávacích nástrojů, vrtáků, apod. Rozšíření mechanického upínání nadále roste.

Jedná se o upevňování přesných vyměnitelných břitových destiček. Tyto destičky se vyrábějí ze slinutých karbidů, keramických materiálů, rychlořezných ocelí, které jsou mechanicky upínané do nástroje. Po opotřebení břitu lze břit snadno vyměnit a v případě použití mnohohranných destiček je možnost destičku uvolnit a pootočit na nový břit. Po otupení všech břitů se destička vymění za novou destičku stejného tvaru.

Výhody konstrukce soustružnických nožů s VBD jsou [1]:

- Podstatné zkrácení vedlejších časů díky rychle výměně otupeného břitu bez vyjímání nástroje a jeho opětovného složitého seřizování.
- Zmenšují se nároky na skladové hospodářství, stačí skladovat pouze vyměnitelné břitové destičky.
- Odpadá přestřování nástrojů.
- Úspora konstrukčních materiálů tělesa nástroje.
- Možnost využití takový nástrojových materiálů, které nelze lepit ani pájet.

Nevýhody konstrukce soustružnických nožů s VBD jsou [1]:

- Vyšší pořizovací náklady.
- Větší nároky na konstrukční prostor nástroje.
- Náročnější technologická příprava výroby nástroje.
- Složitější konstrukce nástrojů s vyššími požadavky na přesnost výroby.



Obr. 2.1. Nože s vyměnitelnými břitovými destičkami [3]

3. Litina

Jedná se o slitinu železa s uhlíkem. Podle diagramu železo-uhlík musí obsahovat více než 2,14% uhlíku (bez vlivu jiných prvků). Litiny, které neobsahují uhlík ve formě grafitu, jsou tzv. litiny samomazné. V Číně se litina začala vyrábět už v 4. století. Litina se slévala dříve než bronz a má vysokou odolnost vůči tlaku a teplotě, a zároveň nízkou pružnost.

Litina se v dnešní době vyrábí roztavením surovin (litinové zlomky, surové železo, litinový vratný materiál, ocelový odpad atd.) v elektrické indukční peci nebo obloukové peci.

Litiny se dělí podle způsobu vyloučení grafitu z železa a podle velikosti a tvaru grafitu. Litiny se dělí na tvárnou, šedou, bílou a temperovanou litinu [4].

3.1. Šedá litina (s lupínkovým grafitem)

Podle normy ČSN EN 1561 je tato litina definována jako slitina železa a uhlíku na odlitky, kde má být uhlík přítomen jako grafit ve tvaru lupínků (lamelárních částic). Materiál má dobré slévárenské vlastnosti a je poměrně levný. S vyšším obsahem křemíku se stává litina s lupínkovým grafitem náchylnější na pevnost v tahu a v ohybu[4].

3.2. Tvárná litina (s kuličkovým grafitem)

Je vázán normou ČSN EN 1563 a uhlík zde převážně přítomen ve tvaru částic kuličkového grafitu. Má vyšší pevnost, tažnost a houževnatost než šedá litina. Tvoření kuličkového grafitu je možné jen v taveninách, které mají nízký obsah síry. Na průběh krystalizace této litiny má největší vliv rychlost ochlazení [4].

3.3. Bílá litina (vznik karbidu železa)

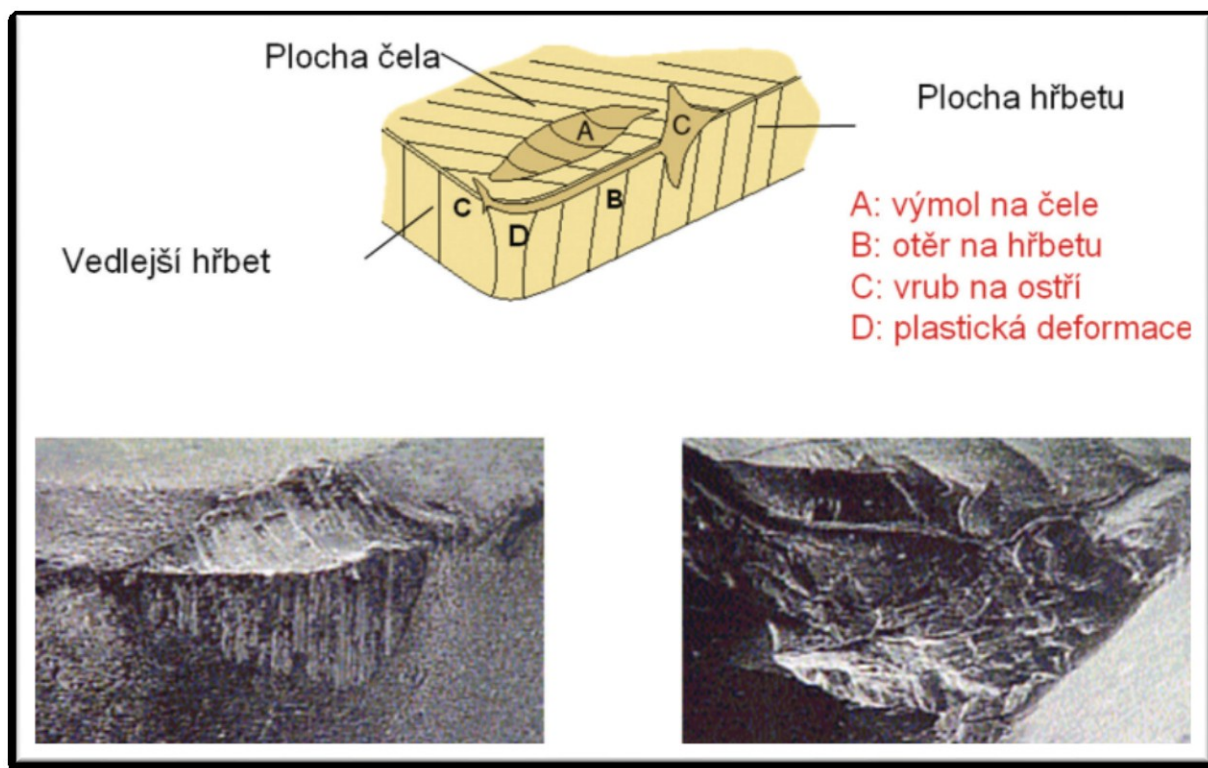
Odpovídá svou strukturou metastabilní rovnováze soustavy Fe-Fe₃C. Po odlití je tvořena směsí eutektického a sekundárního cementitu a perlitu. Tato směs napomáhá obsahu karbidotvorných látek v litině. Tvrdost ovlivňuje obsah cementitu ve struktuře (350-500HB).

3.4. Temperovaná litina (s vločkovým grafitem)

Jedná se o slitinu železa s uhlíkem dána normou ČSN EN 1562, která má tak velký obsah uhlíku s křemíkem, že ztuhne podle metastabilní soustavy jako bílá litina, tedy bez grafitu. Má dobrou houževnatost a obrobitelnost. Své vlastnosti získává tepelným zpracováním, které se nazývá temperování. Odlitek této litiny je před tepelným zpracováním tvrdý křehký, neobrobitelný a má lesklý lom.

4. Opotřebení nástrojů

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles. Má negativní vliv na přesnost a výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Procesy opotřebení lze rozdělit na 6 základních druhů: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační [5]. Způsob vzniku opotřebení je buď působením funkčního povrchu a média, nebo vzájemným otěrem funkčních povrchů. Opotřebení vede k postupné ztrátě funkčnosti nástroje. Opotřebení je zcela normální fyzikální jev, kterému není možno žádným způsobem zamezit, jde ho jej ovlivňovat. Opotřebení ostří musí být kontrolované, předvídatelné a bezpečné.

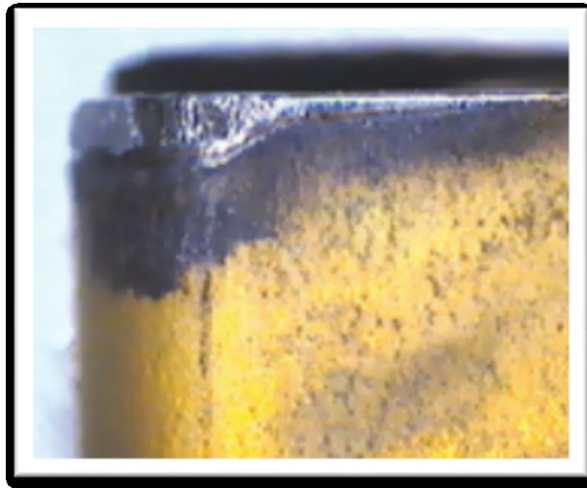


Obr. 4.1. Opotřebení nástroje [5]

4.1. Druhy opotřebení

Otěr na hřbetu

Jeden z žádoucích opotřebení je otěr na hřbetu. Žádoucí je proto, že je kontrolovatelný a předvídatelný. Otěr na hřbetu dochází v krátkém čase, což nelze z životnosti nástroje akceptovat. Hlavní příčinou opotřebení na hřbetu je abraze. Tvrdé vměstky se zasekávají do ostří. Opotřebení na hřbetu je většinou po celé délce jeho ostří. Při rychlém projevení otěru je dobré snížit otáčky stroje.



Obr. 4.2. Otěr na hřbetu [6]

Výmol na čele

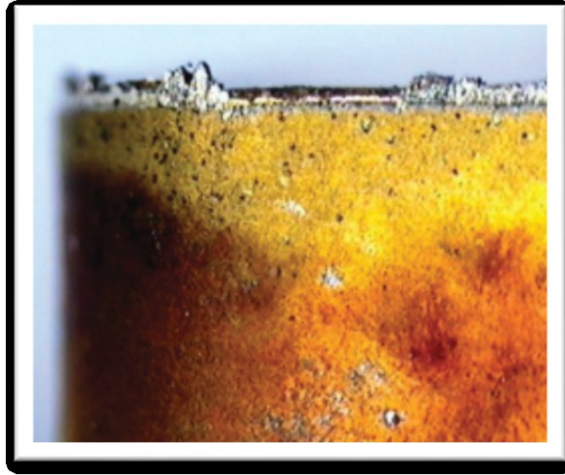
Kombinací porušení struktury, difuze a abrazivního opotřebení vznikají tzv. výmoly na horní části destičky. Mohou vzniknout i velké výmoly, které způsobí vydrolování nebo příliš rychlý otěr na ostří nástroje. Objevuje se jako jamka na vrchní části destičky.



Obr. 4.3. Výmol na čele [6]

Tvoření nárůstku (BUE)

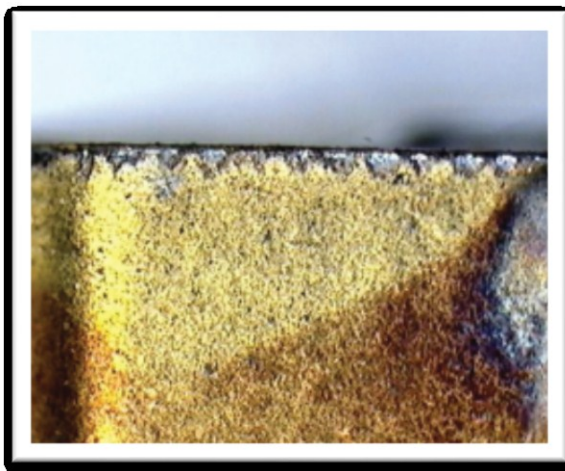
Vzniká kvůli adhezi materiálu. Nárůstek se většinou tvoří kvůli vysokému tlaku, vzniká většinou na místě destičky, kde je zvýšená chemická afinita. S uvolněním nárůstku se uvolní i malé částice materiálu destičky, což po čase má za následek vyštípování ostří.



Obr. 4.4. Tvoření nárůstku [6]

Vyštípování bříty

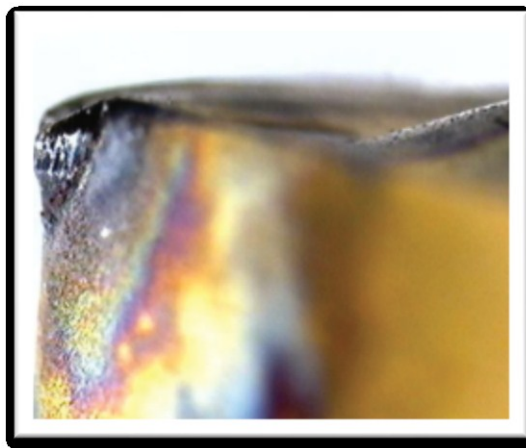
Vyštípování břitů způsobují většinou vibrace obrobku, vřetena nebo stroje. Vměstky na obráběném materiálu tvoří lokální koncentraci napětí, které způsobí vyštípnutí části destičky. Musí se zajistit co nejvyšší tuhost soustavy a minimalizovat ohýbání rezných nástrojů.



Obr. 4.5. Vyštípování bříty [6]

Plastická deformace

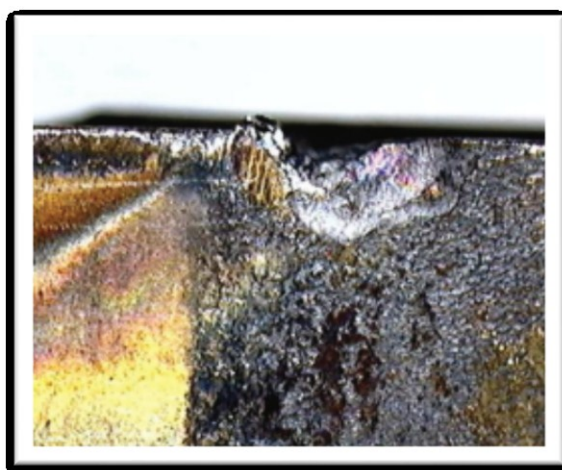
Důvodem vzniku plastických deformací jsou tepelná přetížení. Vysoká teplota způsobí měknutí pojiva a tlak destičce deformuje ostří, kde následně může dojít k odlomení destičky.



Obr. 4.6. Plastická deformace [6]

Vrub na ostří

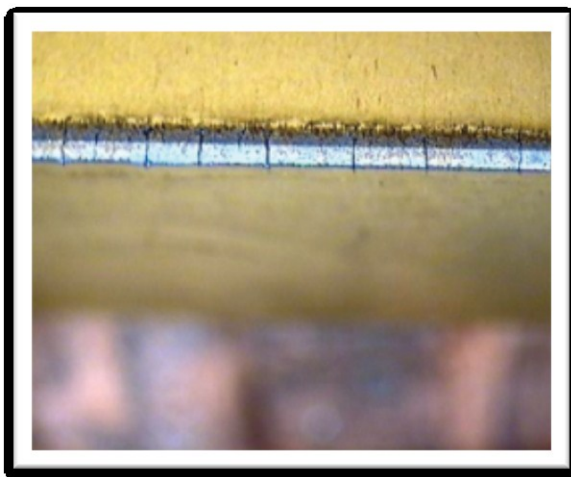
Vzniká tak, že povrch obrobku je abrazivnější a tvrdší než materiál v jádře. Vrub se objevuje u obrábění materiálu s tvrdou povrchovou vrstvou (výkovky, odlitky), nebo u materiálu s deformačním zpevněním (slitiny titanu, nerezové oceli)



Obr. 4.7. Vrub na ostří [6]

Tepelné hřebenové trhliny

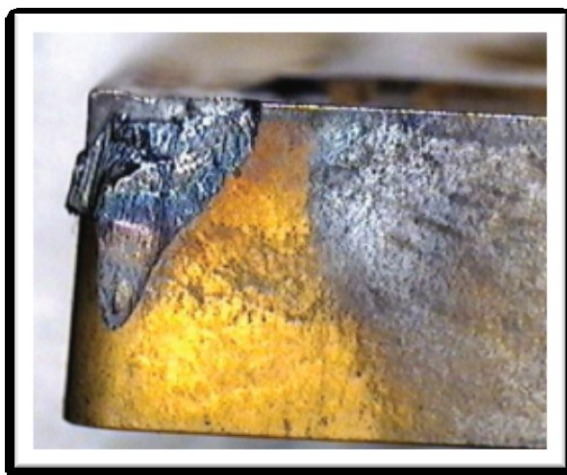
Vznikají kombinací tepelných cyklů (markantní rozdíly teplot ostří), tepelných zatížení a zatížení mechanického. Trhliny se tvoří po celém ostří břitů, může také dojít k vylomení částic karbidu a posléze vyštipování břitů. Často se také objevuje u situací s nepravidelným tokem chlazení.



Obr. 4.8. Tepelné hřebenové trhliny [6]

Vylomení destičky

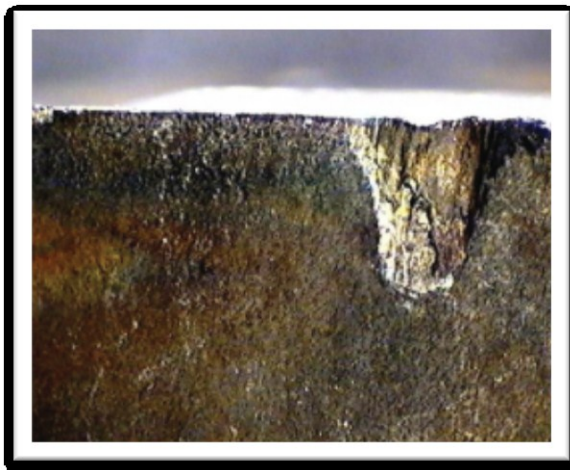
Vylomení destičky nastává jakýmkoli zmíněným způsobem opotřebení destičky, nebo mechanickým přetížením (většinou se stává rychlým najetím do materiálu, nebo krátce po najetí do řezu).



Obr. 4.9. Vylomení destičky [6]

Vylamování ostří

Často se zaměňuje za vznik vrubu na ostří. Způsobuje jej tříska, která zasáhne nevyužívanou část ostří svým krouživým pohybem. Vytváří na destičce vylomené části, které nejsou v místech řezu.



Obr. 4.10. Vylamování ostří [6]

4.2. Druhy měření opotřebení

Opotřebení vzniká za chodu obrábění, tudíž je měření opotřebení velice složitý proces. Měření se dělí na dva druhy. Jedná se o měření přímé a měření nepřímé [7].

4.2.1. Přímé metody měření opotřebení

Přímá metoda je těžko aplikovatelná, kvůli nedostupnosti měřících zařízení při obrábění. Musí se stroj zastavit a obrábění přerušit, což velmi ovlivňuje otupení v dalších etapách měření. Většinou se měřící nástroj vyskytuje u nožového držáku, což přináší změny podmínek při následujícím upnutí a ustanovení.

Mezi přímé metody patří metoda váhová, optická, pneumatická, radioizotopová a metoda nanesené odporové vrstvy.

4.2.2. Nepřímé metody měření opotřebení

Nepřímá metoda se skládá z faktorů, které proces doprovází. Jako například změny barvy a tvaru třísky, změna rozměrů obrobku, zhoršení drsnosti obráběného materiálu, zvýšení výkonu řezání, vznik lesklého proužku na povrchu obrobku, chvění a nežádoucí zvuky při obrábění.

Optické metody

- Metoda založená na odrazu světla.
- Metoda zpracování odraženého paprsku založená na Fourierově transformaci.
- Metoda využívající televizní kamery.

Měření pomocí vibrací

Spočívá na korelaci mezi vibracemi obráběcího stroje a opotřebením nástrojem.

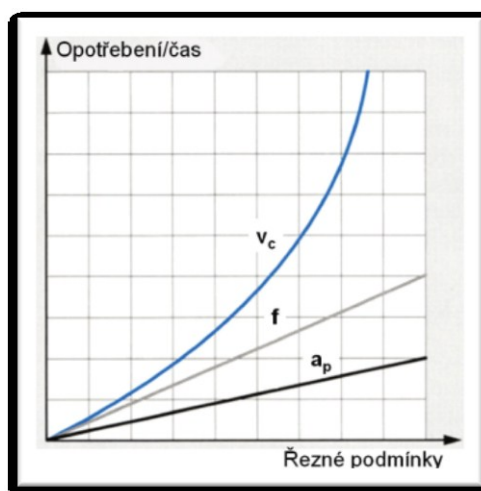
Měření zvuku

Pomocí akcelerometru, který je umístěný v blízkosti držáku snímá zvukové vibrace od tření hřbetu nástroje. Frekvence se rozdělí na vysoké a nízké a jejich poměr informuje o opotřebením nástroje.

5. Trvanlivost, životnost a řezivost nástroje

5.1. Trvanlivost

Trvanlivost je definována jakou součet všech strojních časů obrábění, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a hodnota opotřebení se stanovuje tak, aby měl obrobek požadovanou drsnost, přesnost a tvar) [8].



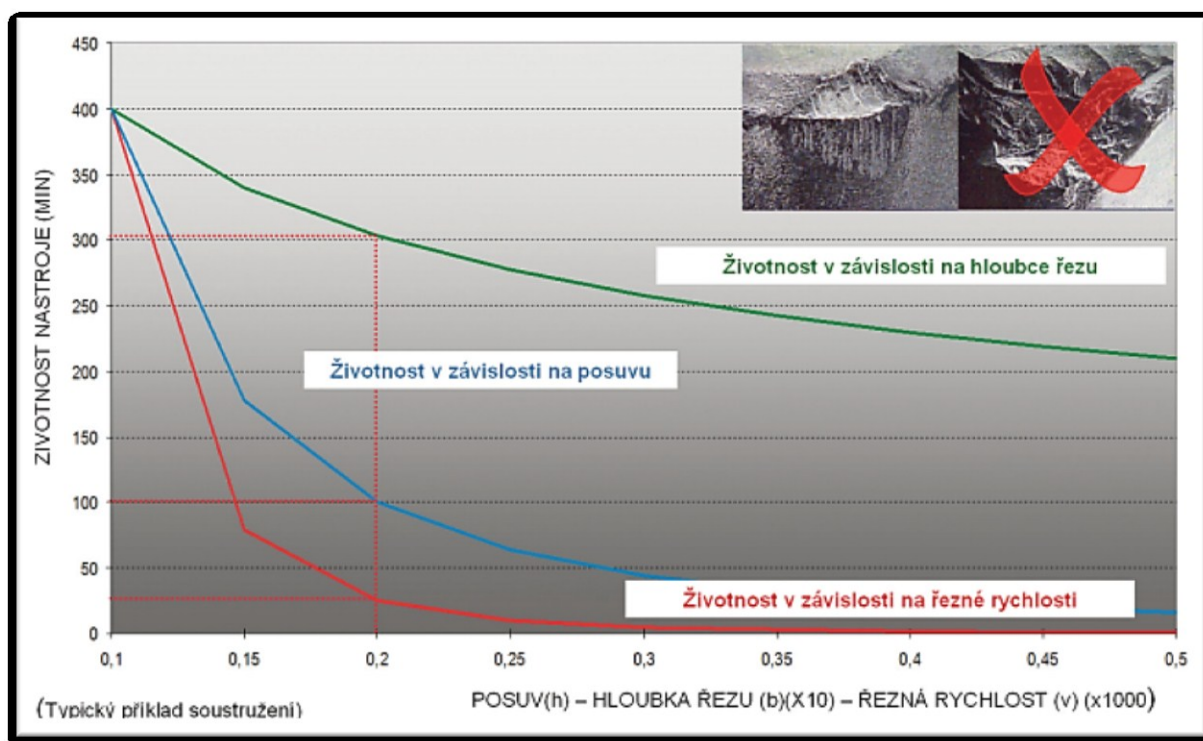
Obr. 5.1. Trvanlivost závislá na opotřebení VB a řezných podmínkách [9]

5.2. Životnost

Životnost je definována jako součet všech trvanlivostí, nebo jako doba od prvního uvedení nástroje do provozu až do jeho vyřazení z činnosti [8]. Řezné podmínky a životnost mezi sebou úzce souvisí (viz. Obr. 5.1.) Při dokonalé vyváženosti se sníží náklady na obrábění.

Životnost břitu nástroje je dána faktory:

- Materiálem obrobku (mechanické a tepelné vlastnosti, vměstky).
- Řezný materiál (poskytuje větší otěruvzdornost, vyšší tepelnou odolnost).
- Řezná geometrie (zajišťuje pevnostní vlastnosti břitů).
- Řezné podmínky (mění se pro optimalizaci nástroje).



Obr. 5.2. Životnost nástroje [9]

5.3. Řezivost nástroje

Řezivost nástroje je ovlivňována **řeznou geometrií** a **řeznými podmínkami**. Řezné podmínky musí být určeny nebo změněny ve správném pracovním rozmezí, aby hlavním typem opotřebení břitu byl oděr na hřbetu nebo výmol na čele (jsou předvídatelné a kontrolovatelné).

Pro správnou formu třísky nesmí být **hloubka řezu** menší než je rádius břitové destičky, avšak nesmí být až moc velká (v porovnání s délkou řezné hrany), aby nenastávalo vylosování břitů. Se špatným nastavením řezných podmínek a větší hloubkou řezu se také zkracuje životnost nástroje.

Posuv, pro zajištění efektivního řezu musí být dostatečný, ale stejně jak u hloubky by neměl přesáhnout polovinu rádiusu břitové destičky. Taktéž by mohlo dojít k vylomení břitu destičky. U nerezových a vysokolegovaných slitin bylo zjištěno, že s větším posuvem se zvyšovala životnost řezného nástroje.

Pro zabránění nárůstu na hraně musí být **řezná rychlost** dostatečně velká, ale při příliš velké rychlosti může dojít k opotřebení vlivem chemických jevů. Řezná rychlost je hlavním rozhodujícím faktorem životnosti nástroje.

Všechny uvedené postřehy jsou v oboru obrábění často označovány jako „Taylorův principi“. Taylor prováděl testy na soustruzích a vytvořil tabulky produktivity, které byly postupem času ještě upravovány.

6. Elektrický odpor (rezistance)

Jedná se o fyzikální veličinu, která má schopnost vést proud elektrickým vodičem. Každý vodič představuje pro elektrický proud určitou „překážku“. Vodič tedy klade protékajícímu proudu „odpor“. Tato vlastnost se nazývá elektrický odpor [10].

Ohmův zákon

Elektrický proud I v kovovém vodiči je při stálém odporu přímo úměrný elektrickému napětí U na konci vodiče. Je-li napětí na koncích vodiče stálé, je proud nepřímo úměrný odporu vodiče [11].

$$I = \frac{U}{R} \quad (6.1)$$

R elektrický odpor $[\Omega]$

V kovových vodičích se fyzikální podstata elektrického odporu vysvětluje představou o silovém působení mezi částicemi během pohybu volných elektronů. Elektrony se průchodem vodiče přibližují ke kmitajícím částicím jiných atomů a iontů a vlivem vzájemného působení sil se volné elektrony při svém pohybu brzdí.

Brždění atomů, tedy zvětšení elektrického odporu lze taky docílit složitější strukturou materiálu, delším drátem, kterým prochází elektrický proud, nebo menším průřezem vodiče (drátu).

Matematický zápis elektrického odporu:

$$R = \rho \cdot \frac{l_o}{S} \quad (6.2)$$

ρ	měrný elektrický odpor materiálu	$[\Omega \cdot \text{m}]$
l_o	délka vodiče	$[\text{m}]$
S	průřez vodiče	$[\text{m}^2]$

Měrný elektrický odpor

Měrný elektrický odpor (rezistivita) je konstanta, udávající způsob ovlivnění vodiče materiálu jeho elektrickým odporem.

Teplotní závislost odporu

Teplotní závislost odporu je pro vodiče a polovodiče rozdílná. S rostoucí teplotou roste i odpor vodičů. Odpor u polovodičů nelineárně stoupá se vzrůstající teplotou.

Měrná vodivost

Měrná vodivost je převrácenou hodnotou měrného odporu. El. odpor značíme R , vodivost G , měrný elektrický odpor ρ a měrnou vodivost γ . Pak tedy platí:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \rightarrow \rho = \frac{1}{\gamma} \quad (6.3)$$

7. Rozbor experimentálního měření

V rámci tohoto měření nebyl zjišťován pouze elektrický odpor. Při tomto experimentu se zároveň zjišťovala teplota, vibrace a opotřebení inteligentního nástroje, kterými se zabývali kolegové.

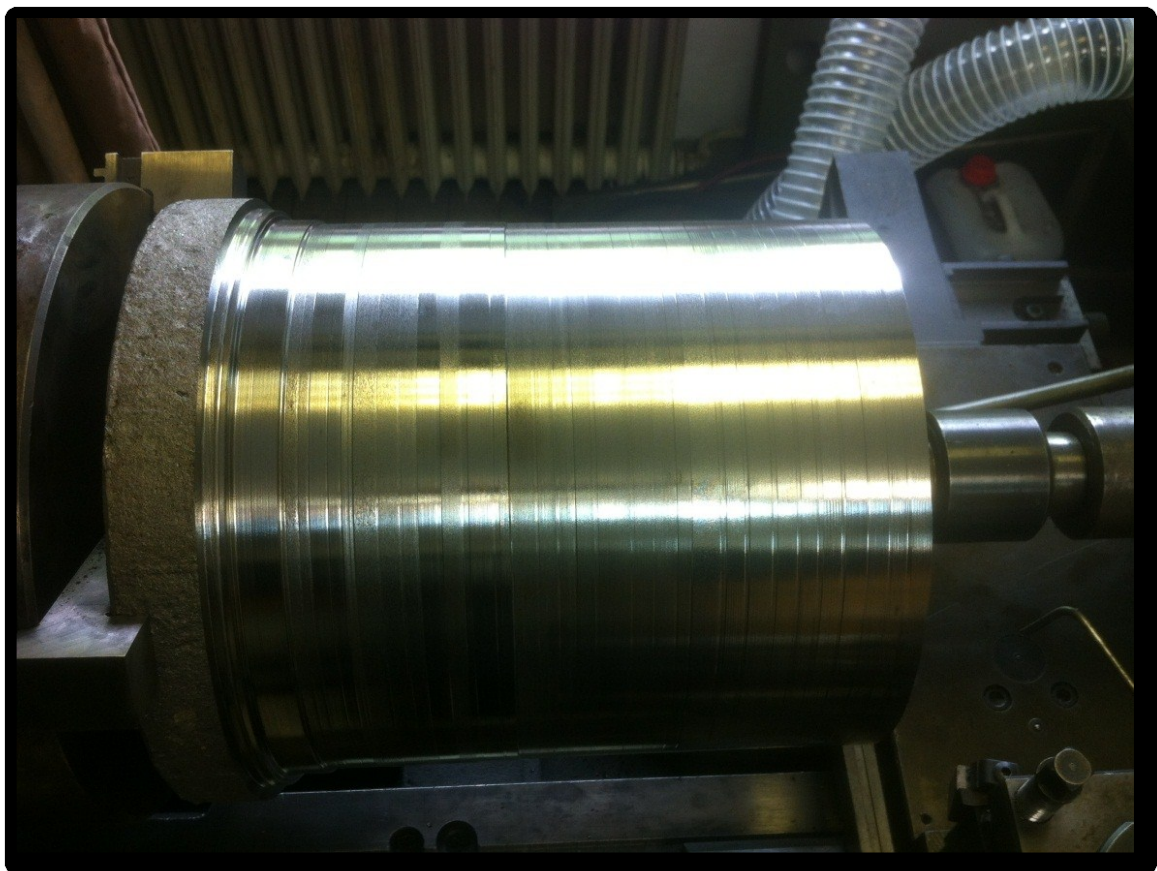
Pro tento experiment bylo použito mnoho přístrojů. Zde jsou popsány pouze přístroje použité ke zjištění závislosti elektrického odporu a opotřebení na čase.

7.1. Materiál použitý při obrábění

Pro tento experiment byla použita tvárná litina GGG- 70 s kuličkovým grafitem. Obrobek byl upnut do tříčelistového sklíčidla na klasickém soustruhu. Materiál kvůli své hmotnosti, velikosti a co největšímu omezení házení byl podepřen hrotem upnutým v pinole koníku.

Značení použité litiny:

DIN 1693	–	GGG-70
EN15163	–	EN-GJS-700-3



Obr. 7.1. Obráběný materiál GGG-70

Tab. 7.1. Chemické složení obráběného materiálu GGG-70 [12]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
3,57	0,604	2,05	0,043	0,018	0,065	0,022	<0.001	0.002

W	Ti	Cu	Al	Co	Pb	Sn	Sb	Mg
<0.003	0.012	0.151	0.012	<0.001	<0.001	0.093	<0.001	0.050

Tab. 7.2. Mechanické vlastnosti materiálu GGG-70 [12]

Pevnost v tahu	$R_m = 700$ [MPa]
Smluvní mez kluzu	$R_{p0.2} = 420$ [MPa]
Tažnost	$A = 2$ [%]

7.2. Stroj

Elektrický odpor byl sledován na univerzálním soustruhu MASCHSTROJ TROJAN C11 MV.

**Obr. 7.2.** Soustruh MAŠSTROJ TROJAN C11 MV**Tab. 7.3.** Pracovní rozsah stroje [13]

Vzdálenost hrotů		1100 [mm]
Oběžný průměr	nad suportem	290 [mm]
	nad ložem	500 [mm]
Průměr sklíčidla		250/315 [mm]
Suport	příčný zdvih	270 [mm]
	podélný zdvih	950 [mm]
Výkon motoru		15 [kW]

7.3. Nástroj

VBD

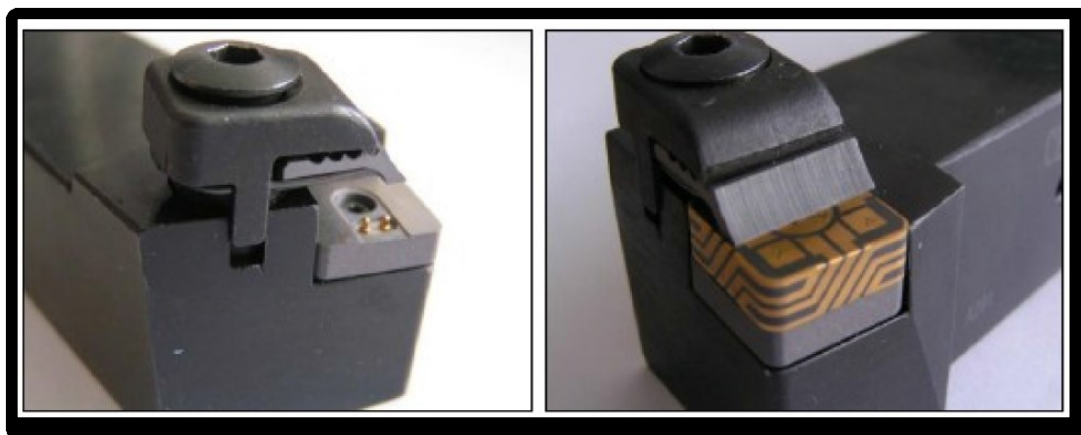
Vyměnitelná břitová destička použita na experimentu byla vyrobena firmou Kyocera s označením KS 6000. Jedná se o destičku čtvercového tvaru vyroubenou s nitridické keramiky obsahující odporovou vrstvu. Materiál povlaku břitové destičky může být Nitrid Titanu. Jedná se pouze o spekulaci, jelikož způsob nanesení a složení odporové vrstvy podléhá know-how firmy Kyocera. Destička z nitridické keramiky je vhodná pro obrábění všech druhů litin, včetně litiny s kůrou. [13]



Obr. 7.3. Vyměnitelná břitová destička KS 6000

Upínací nůž

Speciální upínací nůž pro výměnu břitových destiček značky CERADEX byl také pro tento experiment vyrobený ve firmě Kyocera. Identifikace upínacího nože je CERADEX XCSRN2525M-1207SEN. Držák obsahuje snímače pro vedení elektrického signálu uvnitř těla nože, který následně vede přes kabely do PC. [13]



Obr. 7.4. Upínací nůž CERADEX XCSRN2525M-1207SEN [13]

7.4. Použitá pomocná zařízení

Záznamové zařízení

Naměřená data při obrábění byla zaznamenána pomocí datalogeru ALMENO 2590-4S. Data se zaznamenávají po 30 setinách sekundy do PC pomocí programu ALMENO AMR-Control 5.13, které se následně zapisují do textového dokumentu.

V tomto experimentu dataloger zapisoval teplotu [$^{\circ}\text{C}$] a elektrický odpor [Ω].



Obr. 7.5. Dataloger ALMENO 2590-4S

Mikroskop pro měření opotřebení

Míry opotřebení VBD byly vyhledávány pomocí dílenského mikroskopu INTRACO Micro s barevnou digitální kamerou umožňující pětinasobné zvětšení s uložením do počítače.



Obr. 7.6. Mikroskop INTRACO Micro

8. Vyhodnocení experimentu

Při obrábění se na povrchové odporové vrstvě inteligentního nástroje vytvářel elektrický odpor, který byl přes vyměnitelnou břitovou destičku, speciální upínací nůž a dataloger ALMENO zapisován do počítače. Data, zapsaná do textového dokumentu (viz. Obr. 8.1.), se nadále zpracovávala v programu Microsoft Excel. Nejprve se musely hodnoty z textového dokumentu upravit. Odstranily se plusy a nadbytečné nuly před potřebnými hodnotami pro tento experiment.

```
52<CR>
<LF><#15>DATE:      04.01.00<CR>
<LF>00:21:09.40 01: +0554.4 °C 02: +030.35      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:09.70 01: +0550.0 °C 02: +030.51      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:10.00 01: +0550.0 °C 02: +032.25      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:10.30 01: +0550.0 °C 02: +031.40      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:10.60 01: +0555.3 °C 02: +031.92      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:10.90 01: +0550.6 °C 02: +032.45      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:11.20 01: +0550.0 °C 02: +031.13      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:11.50 01: +0550.0 °C 02: +030.88      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:11.80 01: +0615.9 °C 02: +031.59      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:12.10 01: +0621.6 °C 02: +032.88      <#18><CR>
<LF><ETX><#15>00:21:12.40 01: +0628.6 °C 02: +033.18      <#18><CR>
```

Obr. 8.1. Data zaznamenávající dataloger do textového dokumentu

Následně se vytvořila tabulky s časem, odporem, teplotou a opotřebením pro každé měření. Proběhlo 9 měření, kde poslední dvě sloužily k ověření nalepování obráběného materiálu. Z tabulek se vytvořily dva typy grafů. **Graf závislosti odporu a opotřebení na čase** a **graf závislosti odporu a teplotě na čase**. Z těchto dvou grafů se dále experimentální hodnoty vyhodnocovaly.

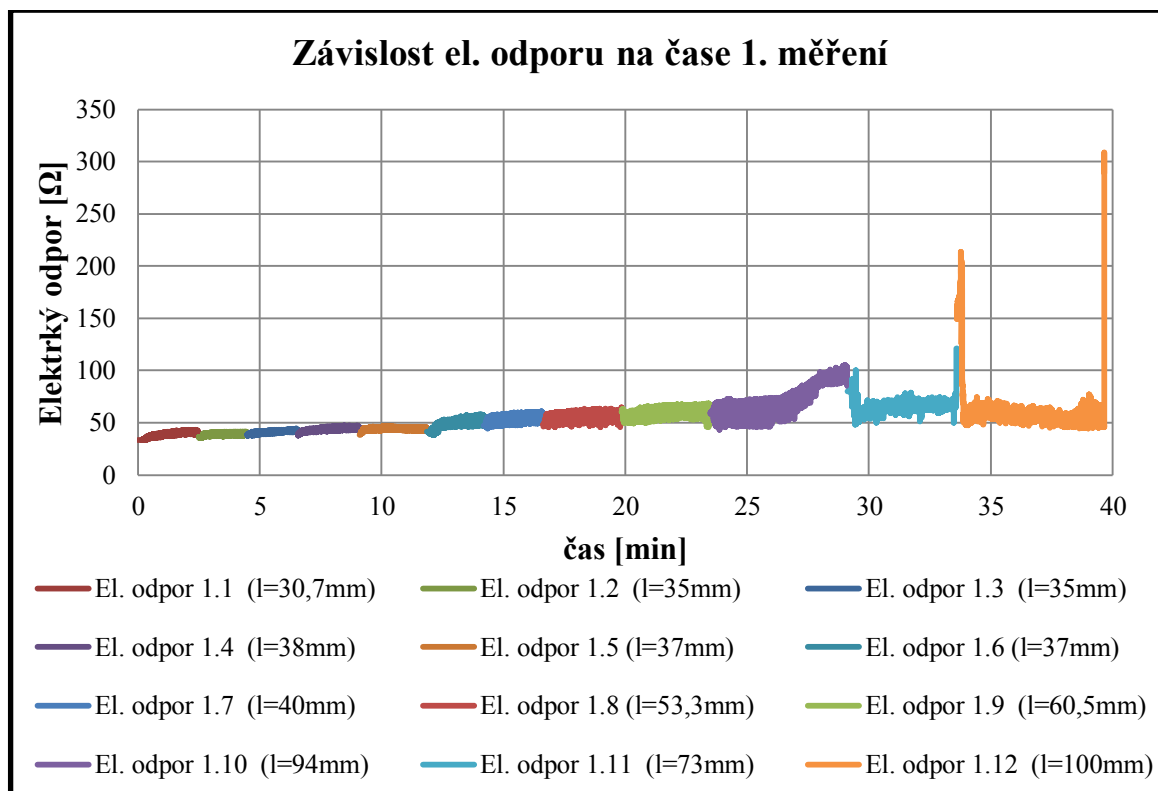
8.1. První měření břitem č. 7

Při prvním měření bylo do viditelného poškození břitové destičky (pod mikroskopem) naměřeno dohromady 12 řezů. Měření trvalo dohromady 39,66 minut a celková délka byla 645,4 mm. Jednalo se o kůru materiálu, která se srážela na rovný povrch, a docházelo k přerušovaným řezům při každé otáčce. Hodnoty elektrického odporu zaznamenávaly přijatelné výsledky k experimentování. Bohužel, kvůli přerušovanému řezu a kůře polotovaru, záznam pro vibraci, opotřebení a teplotu nebyl přijatelný.

První soustružený průměr byl 302 mm. Na tomto průměru proběhlo 5 řezů, kde řezná rychlost byla 94,8 m/min. Následně se průměr změnil na 299 mm a řezná rychlost se snížila na 93,9 m/min do řezu č. 10. Řez č. 11 a č. 12 měl průměr 296 mm a řeznou rychlost 92,9 m/min.

Tab. 8.1. Konstantní řezné podmínky po celou dobu prvního měření:

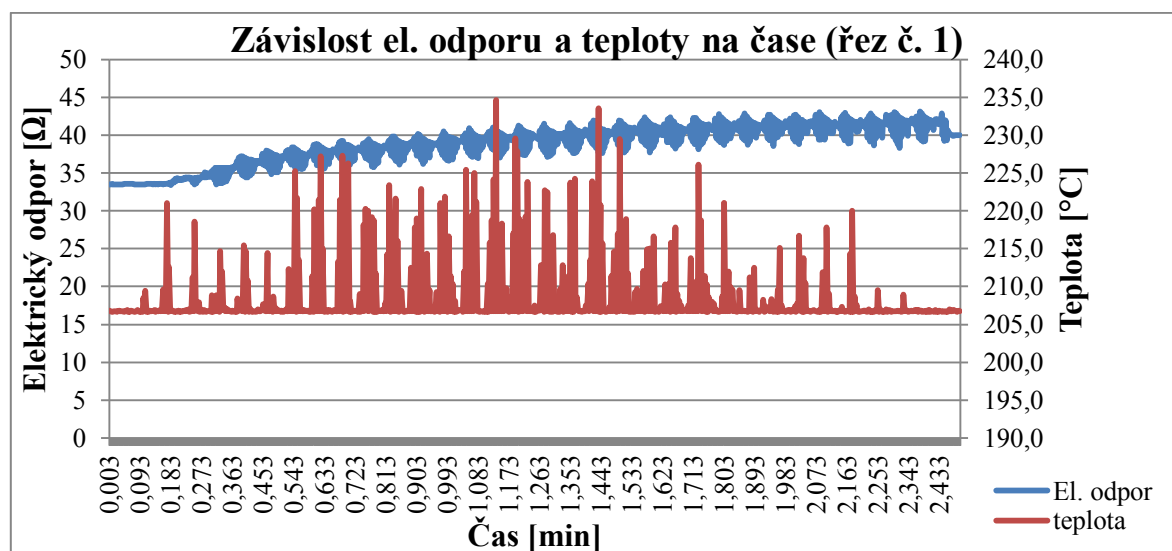
Posuv na otáčku	$f = 0,1$ [mm]
Hloubka řezu	$a_p = 1,5$ [mm]
Počet otáček	$n = 100$ [1/min]
Řezná rychlost	$v_c = 94,8-92,9$ [m/min]

Elektrický odpor**Obr. 8.2.** Závislost elektrických odporů na čase u břitu č. 7

Na obr. 8.2. se nachází závislost odporu na čase při prvním měření. Při prvních pěti řezech elektrický odpor nepřesahuje hranici 50Ω a dochází k minimálnímu opotřebení. Následující řезы už nám obrázek ukazuje menší výkyvy přesahující 50Ω , které se postupně zvětšují. Začínaly vznikat skoky v el. odporu. Řезы mohly být přerušovány, tudíž materiál se opakovaně chladil a hned následně ohříval. Řез č. 10 s délkou $l=94\text{mm}$ už měl výkyvy v rozmezí $49-70\Omega$. V polovině tohoto řезу nám začal el. odpor stoupat a přesáhl hranici 100Ω . Před najetím do obrobku u 11. řезу ($l=73\text{mm}$) vznikl menší výkyv (od 50Ω do 100Ω), který následně klesl a držel se v rozmezí $50-75\Omega$ po celou dobu soustružení. Při vyjetí nástroje z materiálu odpor skočil na 121Ω .

Řez č. 12 ($l=100\text{mm}$) byl podobný jako předchozí řez, jenom s vyššími výkyvy. Při najetí do materiálu el. odpor překročil hranici 200Ω a následně klesl do rozmezí $45\text{--}80\Omega$. U vyjetí nástroje z materiálu překročil odpor hranici 300Ω . Břit u 12. řezu nám pod mikroskopem ukázal (viz. Obr. 8.4.) přerušení odporové vrstvy a měření tohoto břitu bylo u konce.

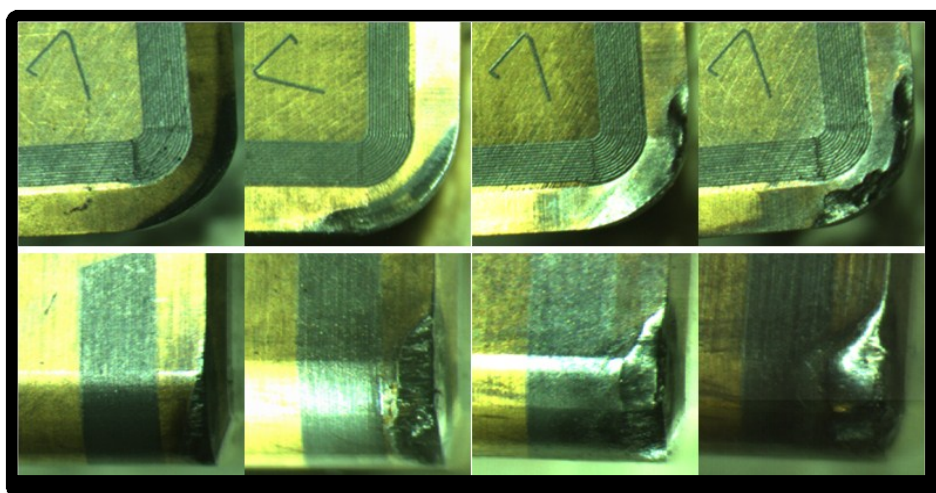
Závislost el. odporu a teploty



Obr. 8.3. Závislost odporu a teploty na čase v řezu č. 1 ($l=30,7\text{mm}$)

Vzhledem k velkému průměru materiálu, byla dostupnost snímače teploty na špičce vyměnitelné břitové destičky velice špatná. Snímač u prvního měření byl zřejmě špatně nastaven. Vytvářel hodnoty, se kterými nelze teplotu vyhodnocovat (viz. Obr. 8.3.).

Opotřebení čela a hřbetu



Obr. 8.4. Opotřebení při 1. měření po soustruž. délkách $L=187$; $472,4$; $545,4$ a $645,5\text{mm}$.

Při prvním měření se opotřebení špatně vyhodnocovalo, proto není v obr. 8.2. zaznamenána křivka opotřebení. Na obr. 8.4. vidíme destičku po pátém řezu ($l=187\text{mm}$), kdy se elektrický odpor začal zvětšovat. Po obrobení délky $L=472,4\text{mm}$ je míra opotřebení destičky blízko od odporové vrstvy, ale stále není ještě el. obvod přerušen. U řezu č. 11 ($L=545,4\text{mm}$) a č. 12 ($L=645,4\text{mm}$) lze vidět nalepování obráběného materiálu na destičku a po zhlédnutí 12. řezu pod mikroskopem se usoudilo konec měření břitů č. 7.

Při pohledu na obr. 8.2. vidíme, že el. odpor ukazoval hodnoty i když už míra opotřebení přerušila odporovou vrstvu. Na toto měření tedy nelze spoléhat, že se přeruší el. obvod vždy při přesáhnutí míry opotřebení.

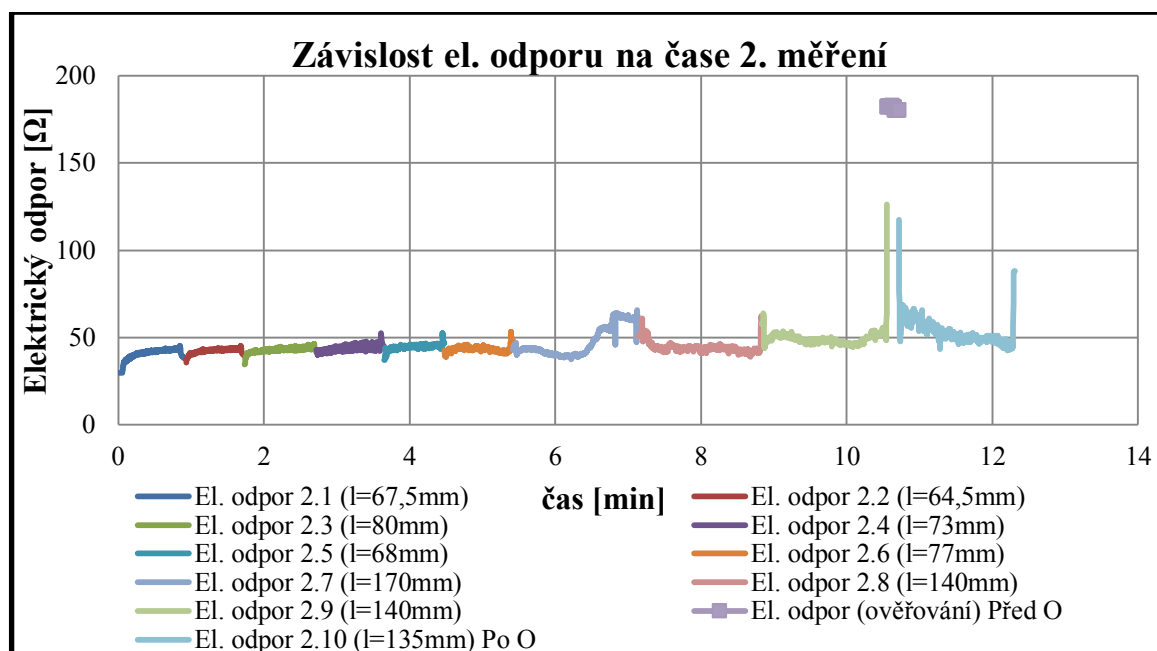
8.2. Druhé měření břitem č. 1

Při druhém měření bylo do viditelného přerušení elektrického odporu břitové destičky (pod mikroskopem) naměřeno dohromady 11 řezů. Měření trvalo dohromady 12,3 minut a celková délka byla $l=985\text{ mm}$. Až po řez č. 4 se soustružilo na průměr 293mm při řezné rychlosti 460 m/min . Následně se změnila tloušťka na průměr 290mm až do řezu č. 7 (řezná rychlost spadla na $455,3\text{ m/min}$). Řez č. 8 a č. 9 byl obráběn na tloušťku 287mm s řeznou rychlostí $450,6\text{ m/min}$. Poslední řez tohoto měření byl soustružen na průměr 284mm a řezná rychlost byla $445,9\text{mm}$.

Tab. 8.2. Konstantní řezné podmínky po celou dobu druhého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1\text{ [mm]}$
Hloubka řezu	$a_p = 1,5\text{ [mm]}$
Počet otáček	$n = 500\text{ [l/min]}$
Řezná rychlost	$v_c = 460\text{--}445,9\text{ [m/min]}$

Elektrický odpor

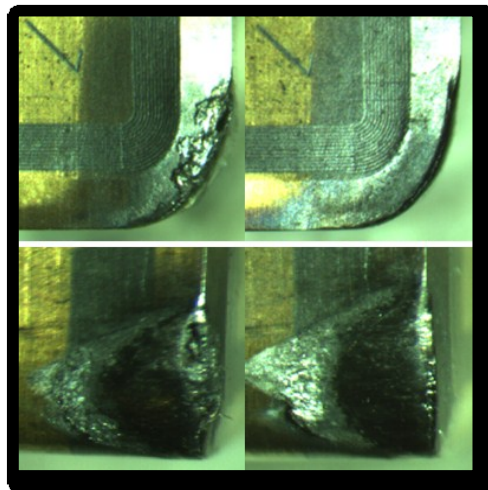


Obr. 8.5. Závislost el. odporů na čase (měření č. 2)

Při prvních 3 řezech ($L=212\text{mm}$) byly výkmity opotřebení velice malé a odpor byl pod hranicí 50Ω . Na konci řezů č. 4 ($l=73\text{mm}$), 5 ($l=68\text{mm}$) a 6 ($l=77\text{mm}$) si lze povšimnout vyššího kmitu opotřebení, který už mírně přesahuje hranici 50Ω . Sedmý řez ($l=170\text{mm}$) za polovinou soustružení vyskočil přes 50Ω a pohyboval se okolo 60Ω . U konce se zase opotřebení nepatrně zvýšilo a po odjetí nástroje kleslo pod 50Ω . Nájezd do 8. Řezu ($l=170\text{mm}$) naskočil na 60Ω a následně klesal okolo 40Ω , kde se udržel po konec soustružení. Při vyjetí vystoupal zase na 60Ω . Elektrický odpor při najetí do řezu č. 9 vytvořil kmit v rozmezí $60\text{--}44\Omega$, pak vystoupal na 48Ω , kde následně vytvářel vlny kmitů mezi $52\text{--}48\Omega$. Při odjetí se míra opotřebení zvýšila až na 128Ω .

Předposlední měření (tedy č. 10 Před Obráběním) byl pouze ověřovací, nejednalo se o řez, který ubíral materiál, ale pouze o vložení destičky do držáku a zpuštění měření. Ověřovalo se, zda na destičce bude probíhat elektrický odpor i bez obrábění. Měření dopadlo tak, že po dobu měření el. odpor kmital ve vysokém rozmezí mezi $180\text{--}184\Omega$. Tyto hodnoty elektrického odporu navyšovaly všechny předešlé hodnoty, proto se udělal zákrok tzv. oškrábání (očištění) břitů destičky nalepené vrstvy obráběného materiálu a poté se destička vyzkoušela na dalším řezu. Poslední řez naskočil na odpor 117Ω , který klesl pod hranici 50Ω . Ze začátku 11. řezu ($l=135\text{mm}$) se kmitly pohybovaly v rozmezí $58\text{--}70\Omega$. V průběhu soustružení se vytvářely klesající vlny kmit, které u konce byly mezi $44\text{--}50\Omega$. Při vyjždění z materiálu odpor vystoupal na 80Ω . Po vložení destičky pod mikroskop při 11. řezu bylo vidět přerušování odporové vrstvy, tudíž měření bylo hotové.

Opotřebení čela a hřbetu



Obr. 8.6. Opotřebení čela a hřbetu při 2. měření před a po očištění.

Stejně jako u prvního měření, břit č. 1 nesplňuje požadavky pro určení míry opotřebení. Tudíž v grafu 8.5. chybí křivka opotřebení. Zde je vidět rozdíl mezi vrstvou nalepeného materiálu před a po oškrábání. Kdy potom u odporu vznikaly úplně jiné výsledky.

V tomto případě stejně jak u prvního měření není vidět v obr. 8.5. klesnutí el. odporu a nulu při viditelném přerušení odporové vrstvy (viz. Obr. 8.6.). Tudíž v tomto měření také nelze spoléhat, že se přeruší el. obvod vždy při přesáhnutí míry opotřebení.

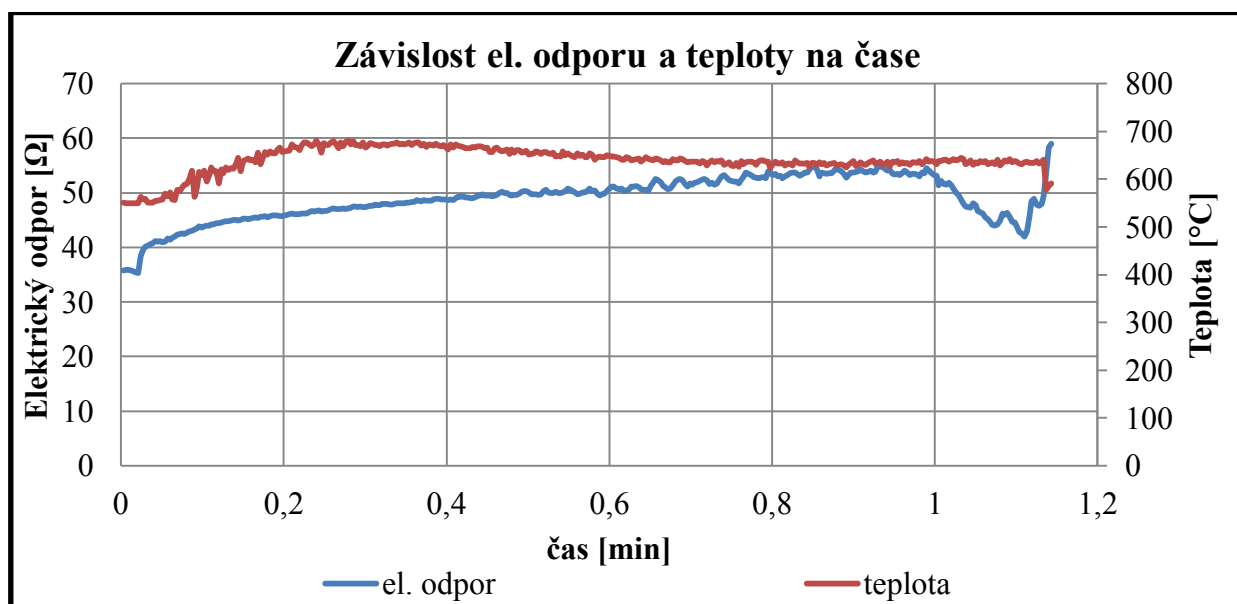
8.3. Třetí měření břitem č. 2

Při třetím měření se břitová destička opotřebila hned při prvním řezu (viz. Obr. 8.8.). Její doba trvání byla 1,143 minut a délka $l = 150$ mm. U tohoto měření tedy nelze dobře zjistit opotřebení pomocí elektrického odporu.

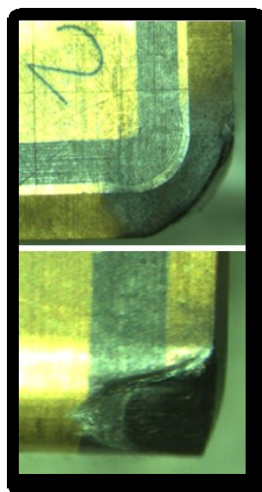
Důvodem mohlo být rychlé najetí do řezu, dlouhé trvání řezu nezahřátého nástrojového materiálu VBD, atd. Toto měření bylo nahrazeno sedmým měřením břitem č. 3, které je popsáno níže.

Tab. 8.3. Konstantní řezné podmínky po celou dobu třetího měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1$ [mm]
Hloubka řezu	$a_p = 1,5$ [mm]
Počet otáček	$n = 800$ [1/min]
Řezná rychlost	$v_c = 713$ [m/min]

Elektrický odpor a teplota**Obr. 8.7.** Závislost el. odporu a teploty na čase (měření č. 3)

Elektrický odpor při najetí byl okolo 35Ω (viz. Obr. 8.7). Po chvíli se mírně zvýšil na 40Ω . Následně se odpor s malinkými kmity lehce zvyšoval. Před koncem měření po jedné minutě el. odpor klesl skoro k 40Ω a v konečných vteřinách se míra opotřebení zvýšila na 59Ω .

**Obr. 8.8.** Opotřebení čela a hřbetu při 3. měření

Kvůli krátkému trvání tohoto měření nelze správně vyhodnotit závislost elektrického odporu na míře opotřebení. Tudíž se na výsledky tohoto měření nebude brát zřetel.

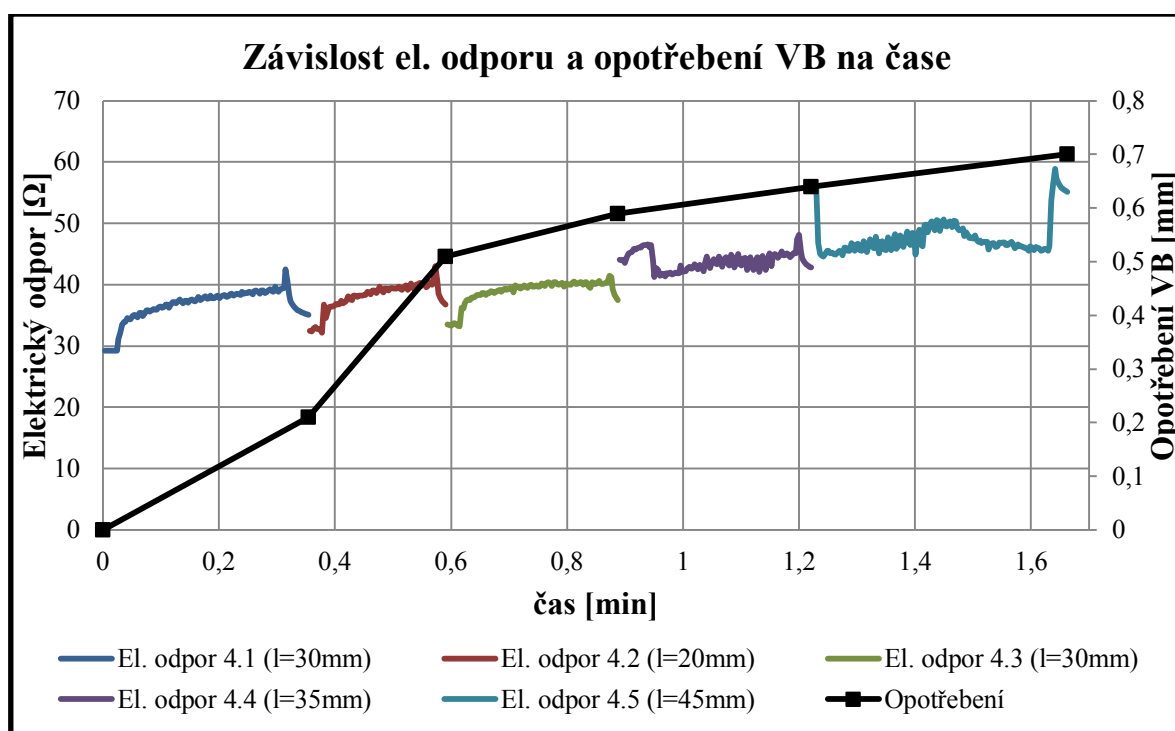
8.4. Čtvrté měření břitem č. 3

Při čtvrtém měření bylo do viditelného přerušení elektrického odporu břitové destičky (pod mikroskopem) naměřeno dohromady 5 řezů. Měření trvalo dohromady 1,66 minut a celková délka byla $l = 150$ mm. Celé čtvrté měření probíhalo na tloušťce 281 mm s řeznou rychlostí 555,9 m/min.

Tab. 8.4. Konstantní řezné podmínky po celou dobu čtvrtého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1$ [mm]
Hloubka řezu	$a_p = 1,5$ [mm]
Počet otáček	$n = 630$ [l/min]
Řezná rychlost	$v_c = 555,9$ [m/min]

Elektrický odpor

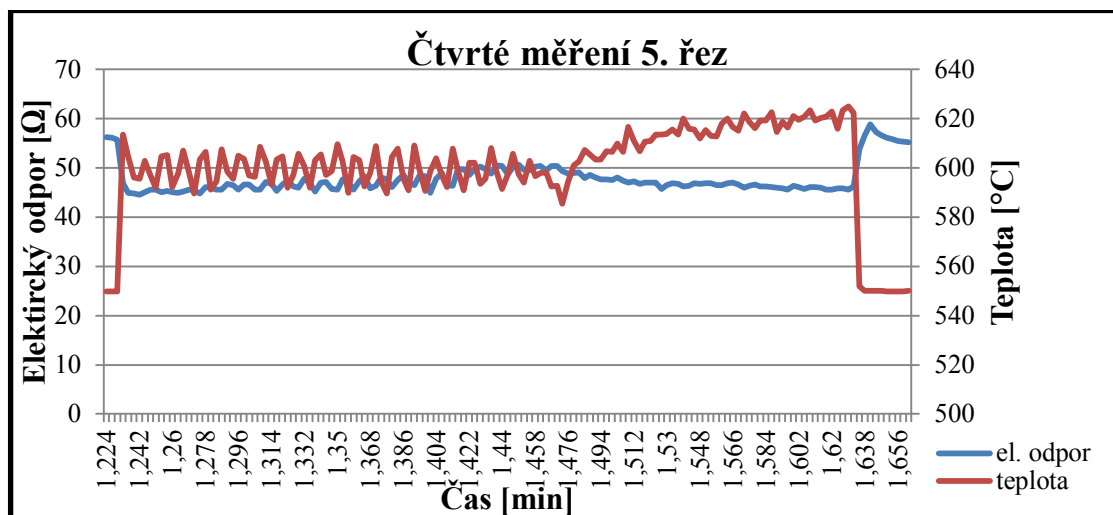


Obr. 8.9. Závislost el. odporů a opotřebení na čase (měření č. 4)

Na začátku měření byl elektrický odpor těsně pod hranici 30Ω (viz. Obr. 8.9.), následně se kmity zvýšily do 40Ω a na konci se míra opotřebení zvýšila 44Ω . Druhý ($l=20$ mm) a třetí ($l=30$ mm) řez probíhal velice podobně jako první řez ($l=35$ mm).

Nájezd do 4. Řezu ($l=35\text{mm}$) byl zvýšený, el. odpor následně klesl a v průběhu pomalými kmity zase vzrůstal. Před koncem se elektrický odpor vyhouplnul k hranici 50Ω a poté mírně klesl. Při nájezdu do řezu č. 5 ($l=45\text{mm}$) byl el. odpor na 55Ω , poté klesl na 45Ω a v polovině soustružení kmity vyrostly na 51Ω a až do konce klesaly na 45Ω . Při vyjíždění se el. odpor vyzdvihnul na 59Ω a poté lehce klesl.

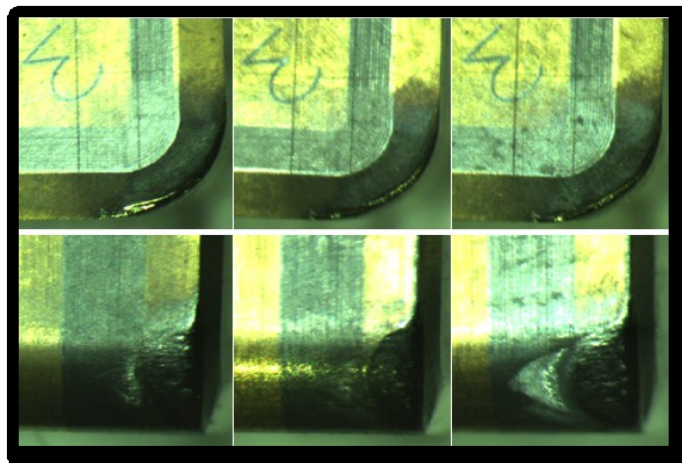
Závislost el. odporu a teploty



Obr. 8.10. Závislost el. odporu a teploty na čase v řezu č. 5 ($l=45\text{mm}$)

Teplota po najetí vystoupala na 618°C (viz. Obr. 8.10.) a kmitala podobně jak el. odpor (teplota kmitala v rozmezí $615\text{--}585^\circ\text{C}$). Za polovinou, kdy el. odpor klesal, se teplota zvýšila. U konce měření se odpor zvyšoval spolu s teplotou. Po vyjetí destičky z řezu teplota klesla na 550°C , kdežto opotřebení kleslo jen trochu.

Opotřebení čela a hřbetu



Obr. 8.11. Opotřebení čela a hřbetu při 4. měření (řez č. 3, 4, 5)

Opotřebení u 3. řezu ($l=30\text{mm}$) vypadá (podle Obr. 8.11.), že už sahá za hranici elektrického obvodu, ale odporové hodnoty ještě neukazovaly velké opotřebení, tudíž pokračovalo se dál. Mohlo se už jednat o nalepení materiálu. Čtvrtý řez ($l=35\text{mm}$) sundal nalepený materiál a je vidět tenká mezera odporové vrstvy. Řez č. 5 ($l=45\text{mm}$), už přesvědčivě ukazuje míru opotřebení a ukončuje toto měření.

Teplota se pohybovala ve všech řezech v rozmezí $580\text{--}620^\circ\text{C}$. Tudíž elektrický odpor roste v závislosti na opotřebení a ne v závislosti na teplotě. Je to dáno tím, že opotřebení zmenšuje průřez vodiče. Obrázek 8.9. při posledním řezu neukazuje pokles na nulovou hodnotu, tedy ukazuje stále propojení el. obvodu i po zřetelném přerušení el. obvodu pod mikroskopem. Tudíž v tomto případě nelze hlídat míru opotřebení pomocí el. odporu.

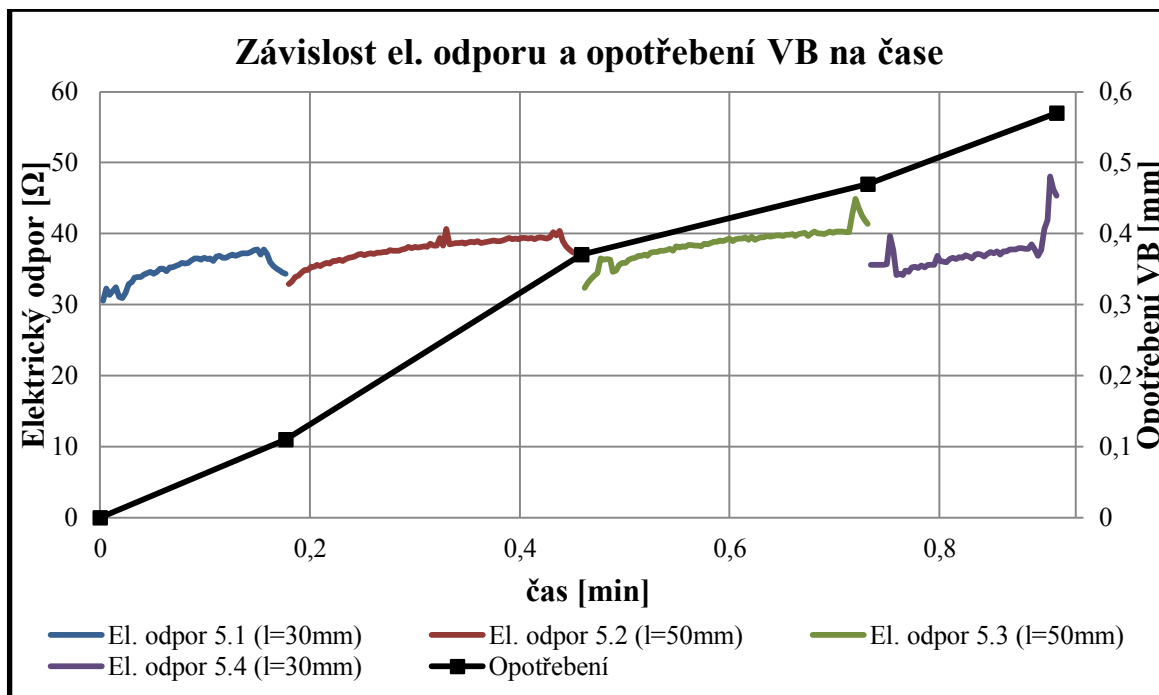
8.5. Páté měření břitem č. 4

Při pátém měření byly do viditelného poškození břitové destičky (pod mikroskopem) naměřeny dohromady 4 řezy. Měření trvalo dohromady 0,912 minut a celková délka byla $l=160\text{ mm}$. Tloušťka při začátku pátého měření byla 281mm (řezná rychlost $555,9\text{m/min}$). Změna nastala až u posledního řezu (tedy řez č. 4), kde se průměr změnil na 278mm a řezná rychlost klesla na $549,9\text{m/min}$.

Tab. 8.5. Konstantní řezné podmínky po celou dobu pátého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1 \text{ [mm]}$
Hloubka řezu	$a_p = 1,5 \text{ [mm]}$
Počet otáček	$n = 630 \text{ [1/min]}$
Řezná rychlost	$v_c = 555,9 \text{ [m/min]}$

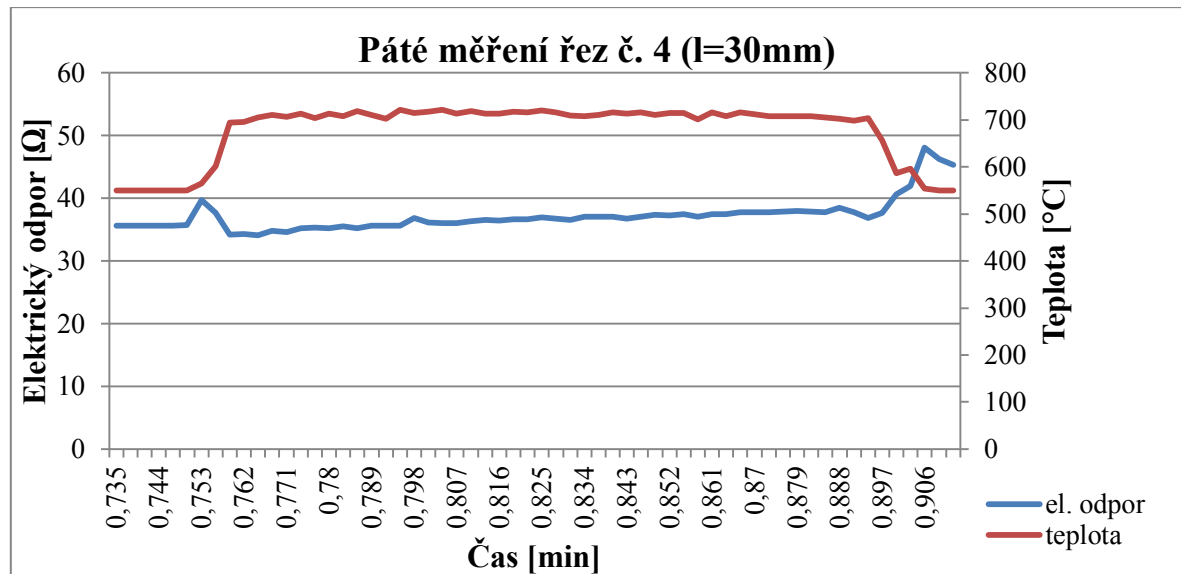
Elektrický odpor



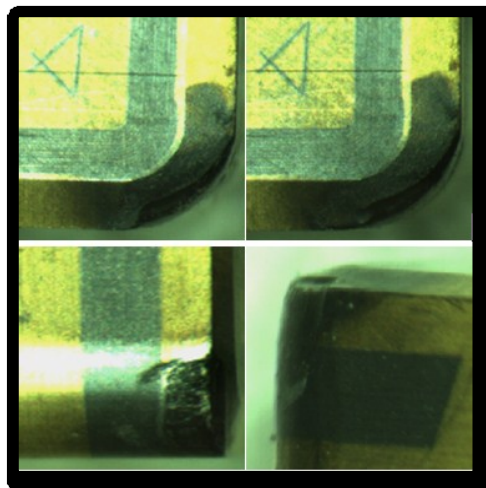
Obr. 8.12. Závislost el. odporů a opotřebení na čase (měření č. 5)

První řez ($l=30\text{mm}$) začínal na 30Ω (viz. Obr. 8.12.), udělal několik nepravidelných kmitů v rozmezí $30\text{--}34\Omega$ a pak kmity začaly růst, kdy u konce se pohybovaly okolo 38Ω . Při vyjždění klesl el. odpor na 35Ω . El. odpor u druhého řezu ($l=50\text{mm}$) do poloviny lehce narůstal, potom vyrostl a přesáhl hranici 40Ω , následně zpátky klesl a až do konce pomalu narůstal. Na konci el. odpor zase vyrostl nad 40Ω a při vyjetí mírně klesl na 37Ω . Míra opotřebení v tomto momentu byla $0,37\text{mm}$. Předposlední řez ($l=50\text{mm}$) začal na 32Ω . Pak vzrostl na 36Ω , chvíli se kmity na tomto el. odporu udržely a poté lehce klesl. Potom celou dobu soustružení pomalu stoupal až do hranice 40Ω a na konci vzrostl na 45Ω a pak lehce klesl na 42Ω . Poslední měřený el. odpor ($l=30\text{mm}$) začal velice nízko (35Ω) poté vytvořil tzv. špici v rozmezí $34\text{--}40\Omega$ a po dobu soustružení s nepravidelnými kmity pomalu vzrůstal na 38Ω . Na konci se elektrický odpor vyhoupl na 48Ω a lehce klesl. Míra opotřebení na konci byla $0,57\text{mm}$.

El. odpor rostl v závislosti na opotřebení. Toto bylo ověřeno na obr. 8.14., kdy poslední fotka ukazuje schod opotřebení VB v odporové vrstvě.

Závislost el. odporu a teploty**Obr. 8.13.** Závislost el. odporu a teploty na čase (řez č. 4)

Na obrázku 8.13. jde pěkně vidět, kdy byla destička v záběru a obrábí. Při mírném zakolísání odporu v 0,753 minutě najela destička do řezu a obráběla materiál. V závislosti na tom vyrostla teplota na teplotní hladinu soustružení (tedy 700°C). Při vyjždění z řezu teplota klesá a el. odpor mírně stoupá.

Opotřebení čela a hřbetu**Obr. 8.14.** Opotřebení čela a hřbetu při 5. měření (řez č. 3, 4)

Obrázek 8.14. ukazuje řezy č. 3 a 4. Na prvním obrázku opotřebení VB je vidět ještě úzká mezera odporové vrstvy U řezu č. 4 je již opotřebení VB za odporovou vrstvou, tudíž je měření u konce.

Při pohledu na obrázek 8.11. elektrický odpor neukazuje ani náznak míry opotřebení, i když už je el. obvod přerušen. V tomto případě také nelze spoléhat na hlídání míry opotřebení pomocí elektrického odporu.

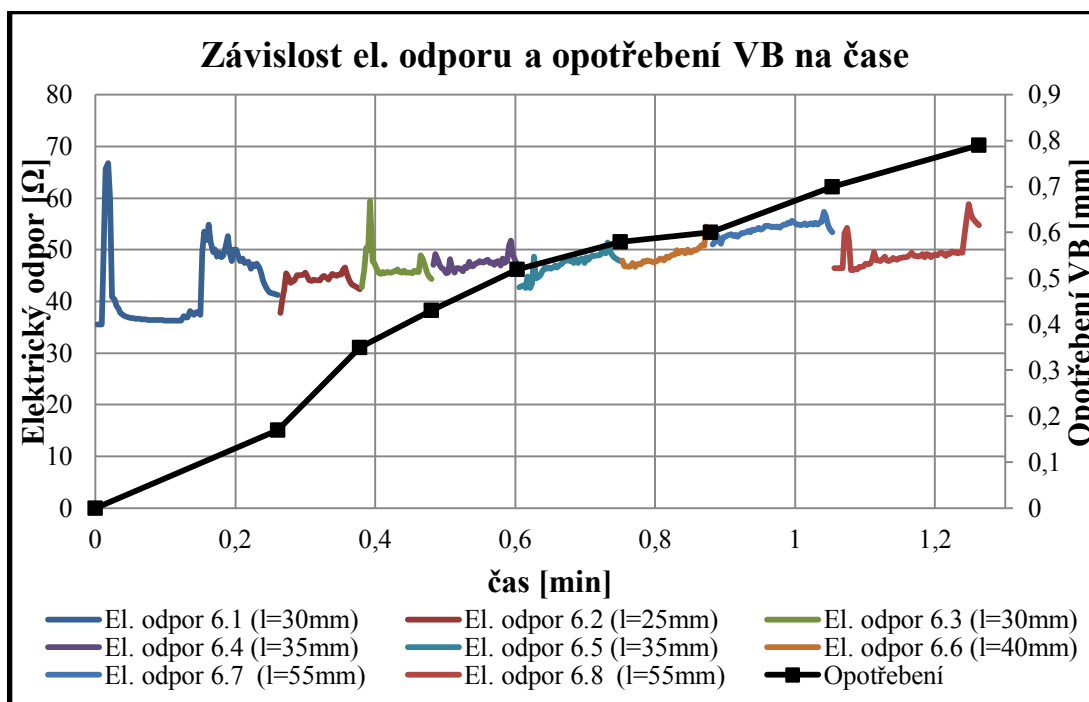
8.6. Šesté měření břitem č. 5

Při šestém měření bylo do viditelného poškození břitové destičky (pod mikroskopem) naměřeno dohromady 8 řezů. Měření trvalo dohromady 1,26 minut a celková délka byla $l = 305$ mm. Průměr prvních pěti řezů byl 275mm s řeznou rychlostí 544m/min. Zbylé 3 řezy klesly s průměrem o 3mm, takže byl průměr 272mm. Řezná rychlost klesla na 538,1m/min.

Tab. 8.6. Konstantní řezné podmínky po celou dobu šestého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,3$ [mm]
Hloubka řezu	$a_p = 1,5$ [mm]
Počet otáček	$n = 630$ [1/min]
Řezná rychlost	$v_c = 544$ -538,1 [m/min]

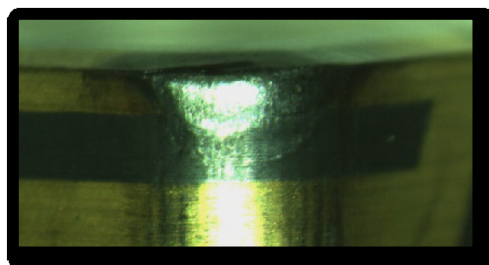
Elektrický odpor



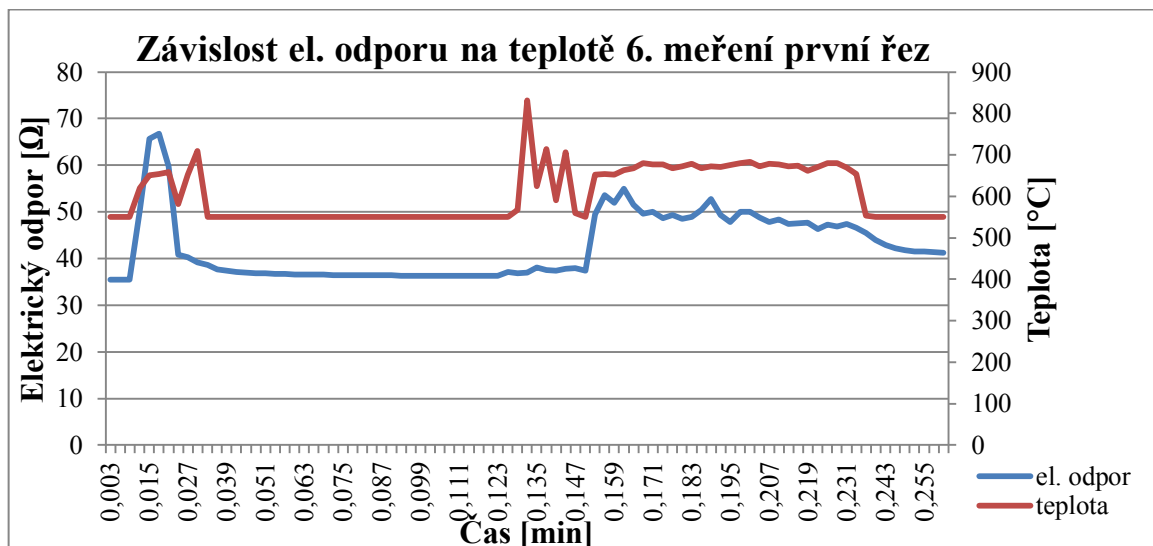
Obr. 8.15. Závislost el. odporů a opotřebení na čase (měření č. 6)

První řez 6. měření ($l=30\text{mm}$) začal el. Odpor stoupavým kmitem z 36Ω až na 68Ω a následně klesl nazpět k 38Ω (viz. Obr. 8.15.), kde do poloviny pomalu narůstal. Kousek za polovinou prvního řezu el. odpor vystoupal na 55Ω a nepravidelnými kmity klesal až po konec měření. Druhý řez ($l=25\text{mm}$) trval kratší dobu a začátkem měření el. odpor krátce vystoupal na 45Ω , kde se pohybovaly kmity v rozmezí 3Ω až po konec měření, kde odpor při vyjetí z řezu mírně klesl. 3. řez ($l=30\text{mm}$) na začátku vytvořil kmit v rozmezí $43\text{--}60\Omega$ poté klesl na 45Ω a udržoval se tak po delší dobu tohoto měření. U konce el. odpor vytvořil kmit v rozmezí $49\text{--}44\Omega$. Elektrický odpor v řezu č. 4 ($l=35\text{mm}$) po celou dobu v malém rozmezí nepravidelně kmital. Při odjetí destičky ze záběru se odpor krátce zvýšil a poté klesl. Pátý řez ($l=35\text{mm}$) tohoto měření se vyznačoval ze začátku nepravidelným kmitáním el. odporu. Následně v malých intervalech klesl a při odjetí z řezu mírně klesl. Řezy č. 6 ($l=40\text{mm}$) a č. 7 ($l=55\text{mm}$) probíhaly podobně a to jen s malými rostoucími kmitavými rozdíly elektrického odporu a na jejich koncích byl zaznamenán mírný pokles el. odporu. Poslední řez ($l=55\text{mm}$) šestého měření na začátku odpor vytvořil špici v rozmezí $47\text{--}55\Omega$ a poté po konec měření vytvářel nepravidelné rostoucí kmity.

Na konci při vyjetí z řezu vyrostl k hranici 60Ω a mírně klesl. Míra opotřebení v tomto momentu byla už za polovinou odporové vrstvy (viz. Obr. 8.16.) a vycházela na $0,8\text{mm}$.



Obr. 8.16. Viditelné opotřebení špice destičky při 6. měření v řezu č. 8 ($l=55\text{mm}$)

Závislost odporu a teploty**Obr. 8.17.** Závislost el. odporu a teploty na čase v řezu č. 1 ($l=30\text{mm}$)

První řez při šestém měření nám pěkně znázorňuje závislost el. odporu na teplotě (viz. Obr. 8.17.). Na začátku a v polovině řezu se při zvětšení elektrického odporu také zvětší teplota obrábění. Vyjetím nástroje z řezu el. odpor s teplotou stejně klesá.

Po ověření se zjistilo, že elektrický odpor roste v závislosti na opotřebení a ne v závislosti na teplotě. Je to dáno tím, že opotřebení zmenšuje průřez vodiče. Obrázek závislosti el. odporu a opotřebení VB na čase (viz. Obr. 8.15.) při posledním řezu neukazuje pokles na nulovou hodnotu, tedy ukazuje stále propojení el. obvodu i po zřetelném přerušení el. obvodu pod mikroskopem (viz. Obr. 8.16). Tudíž v tomto případě také nelze hlídat míru opotřebení pomocí el. odporu.

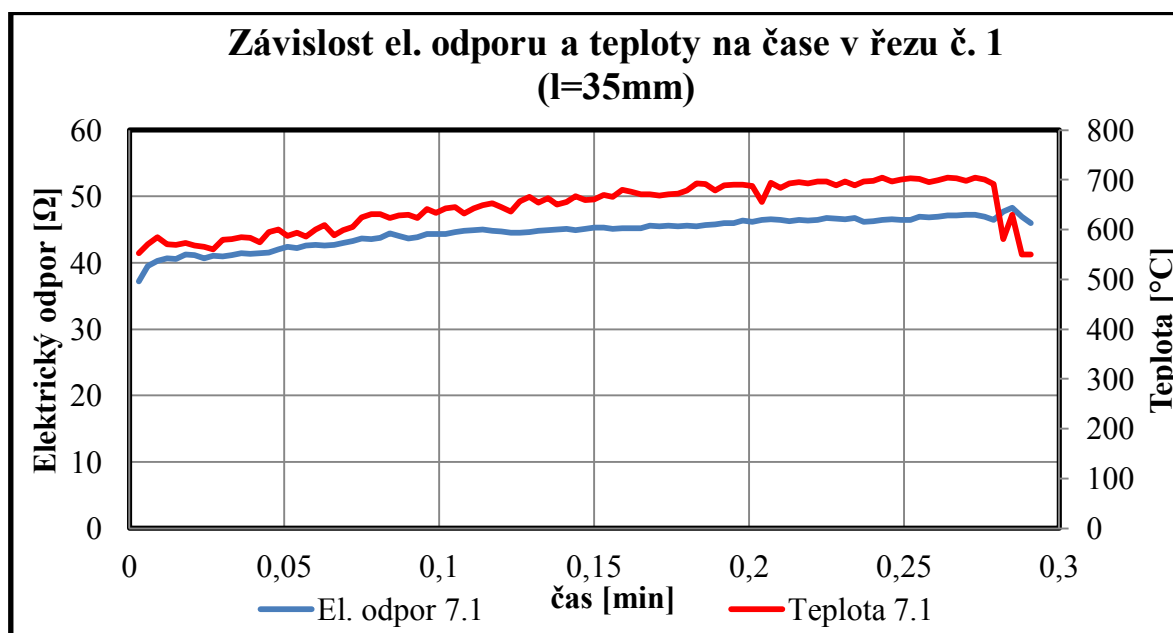
8.7. Sedmé měření břittem č. 6 – náhrada za 3. měření

Při sedmém měření, náhradním za třetí měření, byly do viditelného poškození břitové destičky (pod mikroskopem) naměřeny dohromady 2 řezy. Měření trvalo 0,534 minut a celková délka byla $l = 80\text{ mm}$. Průměr u obou řezů byl 269 mm a řezná rychlost $675,7\text{ m/min}$.

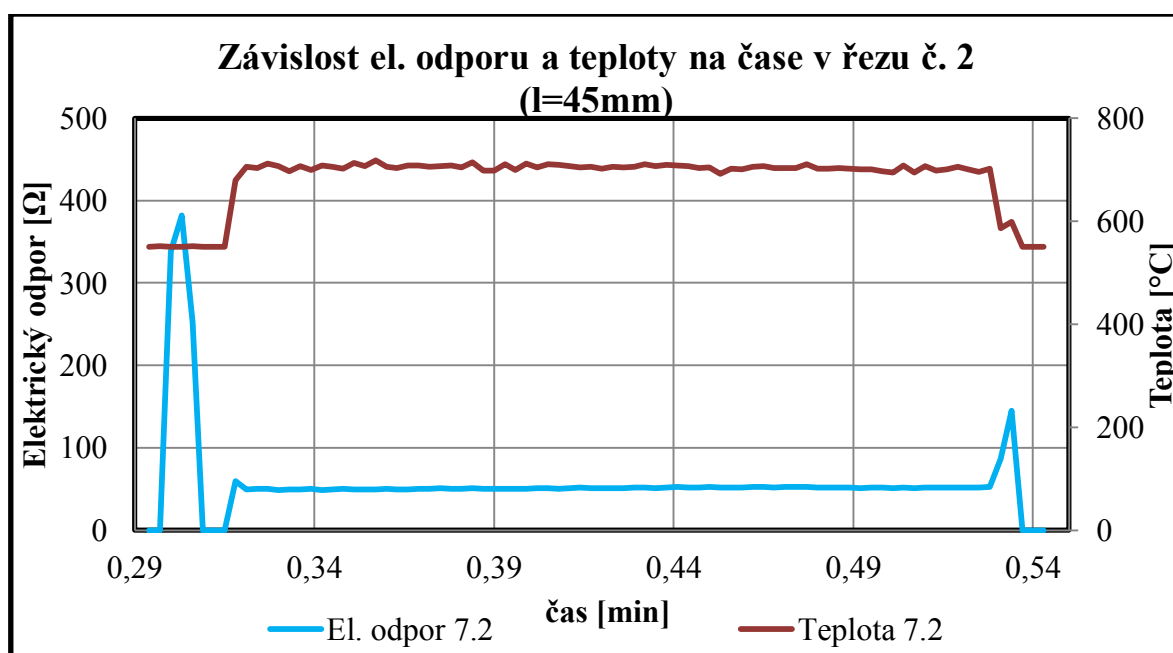
Tab. 8.7. Konstantní řezné podmínky po celou dobu sedmého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1\text{ [mm]}$
Hloubka řezu	$a_p = 1,5\text{ [mm]}$
Počet otáček	$n = 800\text{ [l/min]}$
Řezná rychlost	$v_c = 675,7\text{ [m/min]}$

Elektrický odpor a teplota



Obr. 8.18. Závislost el. odporu a teplot na čase 7. měření (břit č. 1)

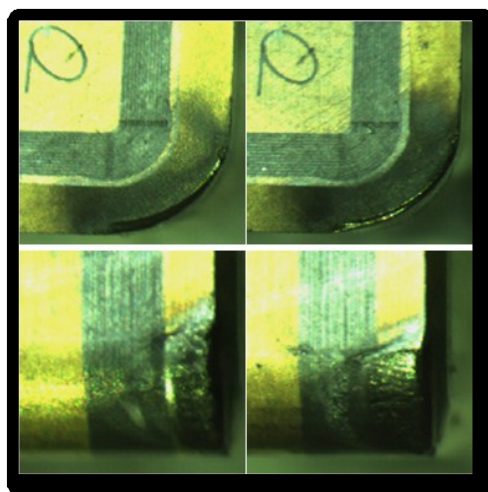


Obr. 8.19. Závislost el. odpor a teploty na čase 7. měření (břit č. 2)

Obrázek závislosti el. odporů a teplot na čase musel být rozdělen na dva, kvůli vysokému skoku opotřebení na začátku řezu č. 2 (viz. Obr. 8.19). Hodnoty 1. řezu obrázek ukazoval nepřesně.

El. odpor při njetí do 1. Řezu (viz. Obr. 8.18.) mírně stoupl a poté mírnými kmity spolu s teplotou stoupal k 46Ω , kde při vyjetí z řezu vytvořil mírný kmit v rozmezí $45\text{--}49\Omega$. Teplota stoupala závisle na el. odporu. Druhý řez ($l=45\text{mm}$) už začínal bez el. odporu, který po njetí do materiálu se zvýšil na 382Ω . Poté zase vznikla přerušená odporová vrstva nulovou hodnotou. Po chvíli el. odpor vyskočil na 50Ω , kde se malinkými kmity udržoval až na konec soustružení. Při vyjetí z řezu el. odpor vystoupal na 150Ω a pak zase klesl na nulu. Už na začátku soustružení 2. řezu bylo díky nulovým hodnotám jasné, že odporová vrstva je již přerušena.

Opotřebení čela a hřbetu



Obr. 8.20. Opotřebení čela a hřbetu při 7. měření (řez č. 1 a 2)

Po prvním řezu je ještě vidět malý kousek odporové vrstvy (viz. Obr. 8.20.), ale přitom už byla odporová vrstva někde přerušena (viz. Obr. 8.19.). Následně řez č. 2 už ukazuje vstup opotřebení do odporové vrstvy v plném rozsahu.

V posledním měření na této destičce, které bylo náhradou za třetí měření s břitem č. 2, se na konci prvního řezu někde přerušila odporová vrstva. Posledním řez zřejmě nezalepil všechny přerušené místa odporové vrstvy, tudíž na začátku i na konci řezu poprvé el. odpor ukázal nulovou hodnotu (viz. Obr. 8.19.)

8.8. Osmé měření – zkouškový pokus č. 1

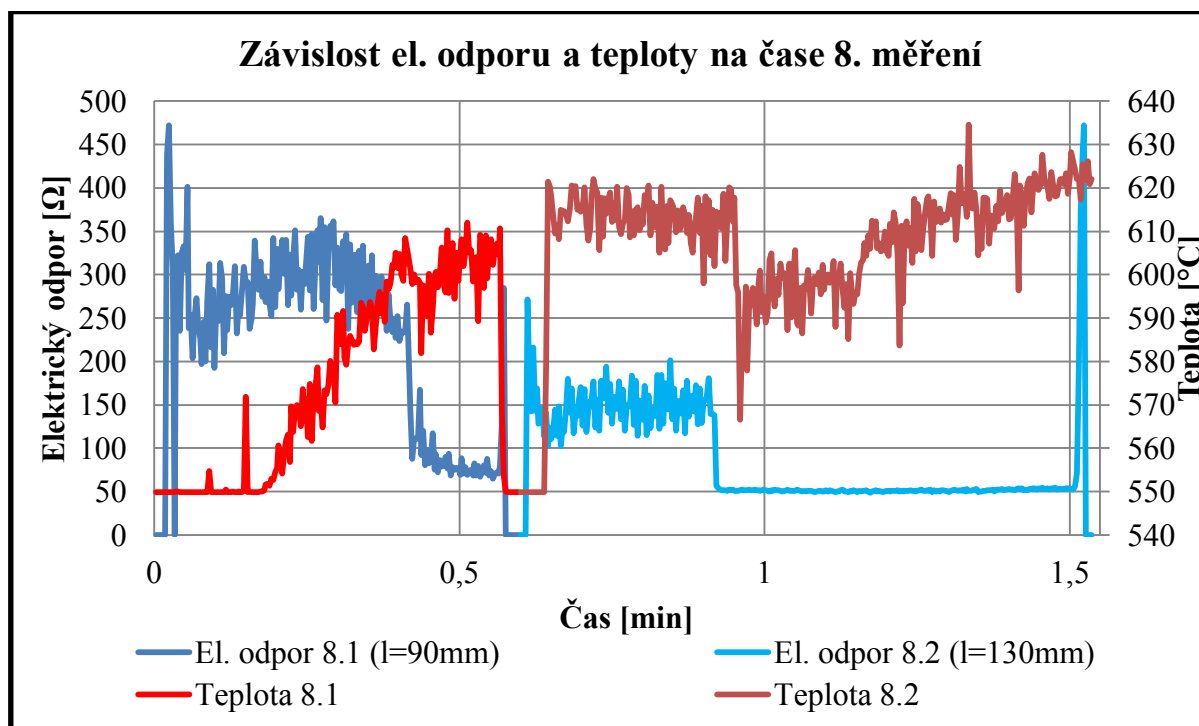
Osmé měření mělo za úkol ověřit nalepování obráběného materiálu na již opotřebovanou destičku. Proběhly 2 řezy. Měření trvalo dohromady 1,47 minut a celková délka byla $l = 220$ mm. Průměr i řezná rychlost byla stejná jak u 7. měření. Tedy $D = 269$ mm a $v_c = 675,7$ m/min.

Obráběný materiál propojil svou elektrickou vodivostí elektrické odpory a proto se v měření elektrický odpor zapisoval. Zapisoval se až v neuvěřitelně velkých hodnotách (viz. Obr. 8.22.).

Tab. 8.8. Konstantní řezné podmínky po celou dobu osmého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1$ [mm]
Hloubka řezu	$a_p = 1,5$ [mm]
Počet otáček	$n = 800$ [1/min]
Řezná rychlost	$v_c = 675,7$ [m/min]

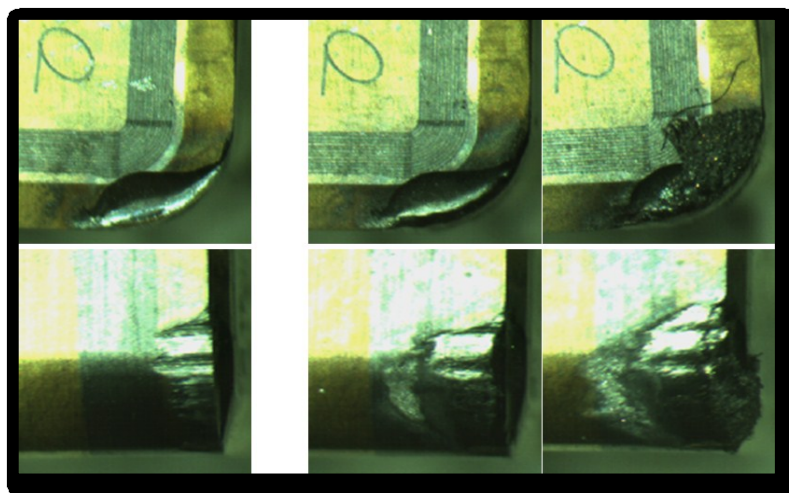
Elektrický odpor



Obr. 8.21. Závislost el. odporů a teplot na čase (měření č. 8)

Elektrický odpor v prvním řezu (viz Obr. 8.21.) začínal bez el. odporu a následně při najetí do řezu vyrostl až na 480Ω . Do dvou třetin soustružení elektrický odpor pohyboval ve vysokých stovkových hodnotách a kmital v rozmezí $200\text{--}350\Omega$. Poté el. odpor klesl pod 100Ω a nad tuto hranici se dostal až při vyjetí z řezu kdy el. odpor vyrostl na 280Ω a následně klesl na nulovou hodnotu. V řezu č. 2. ($l=130\text{mm}$) elektrický odpor už nenaskočil do takové velikosti jak na začátku prvního řezu, ale dostal se na 250Ω , kde poté spadl na rozmezí $100\text{--}200\Omega$ a pohyboval se zde po delší dobu. Ve třetině řezu náhle el. odpor klesl na hranici 50 kde se udržoval až po konec soustružení. Při vyjždění z řezu el. odpor vyrostla na 450Ω a poté zaznamenával nulovou hodnotu. Když elektrický odpor klesl, tak v závislosti na to začala růst teplota.

Opotřebení čela a hřbetu



Obr. 8.22. Opatřebení čela a hřbetu destičky před měřením a během dvou po sobě jdoucích zkouškových řezů. (8. měření)

Na obrázku 8.22. je vidět opotřebovaná destička před měřením (vlevo), která byla vybrána pro ověření nalepování obráběného materiálu. Opatřebení na této destičce bylo ve tvaru žlábků na čele břitu KT, což je forma difuzního opotřebenění. Hřbet destičky ukazuje opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu VB, tudíž se může také jednat o adhezivní a oxidační opotřebení. První řez ($l=90\text{mm}$), který je na obrázku 8.22. uprostřed, nám ukazuje nalepení obráběného materiálu na hřbetu destičky. El. odpor byl stále viditelně přerušen na čele břitu. Tudíž se udělal ještě jeden řez (na obr. 8.22. vpravo), který měl délku soustružení $l=130\text{mm}$. Tento řez ukazuje velké množství nalepeného soustruženého materiálu jak na čele, tak i na hřbetu destičky.

Celkové opotřebení nástroje bylo již příliš velké a nalepený materiál už nedokázal překrýt celé opotřebení destičky. Tudíž na obr. 8.21. oba řezy začínaly a končily nulou.

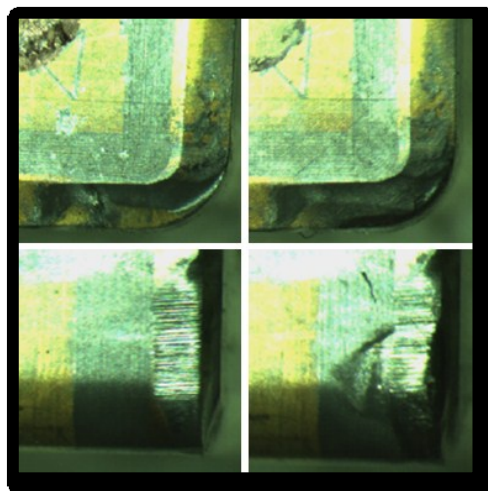
8.9. Deváté měření – zkouškový pokus č. 2

Deváté měření mělo stejně jako 8. měření ověřit nalepování materiálu na opotřebovanou zkouškovou vyměnitelnou břitovou destičku. Vyzkoušel se jenom jeden řez. Řez trval 0,36 minut a celková délka byla $l = 70$ mm. Průměr a řezná rychlost byla stále stejná. Tedy $D = 269$ mm a $v_c = 675,7$ m/min.

Tab. 8.9. Konstantní řezné podmínky po celou dobu devátého měření:

Posuv na otáčku	$f = 0,1$ [mm]
Hloubka řezu	$a_p = 1,5$ [mm]
Počet otáček	$n = 800$ [1/min]
Řezná rychlost	$v_c = 675,7$ [m/min]

Opotřebení čela a hřbetu

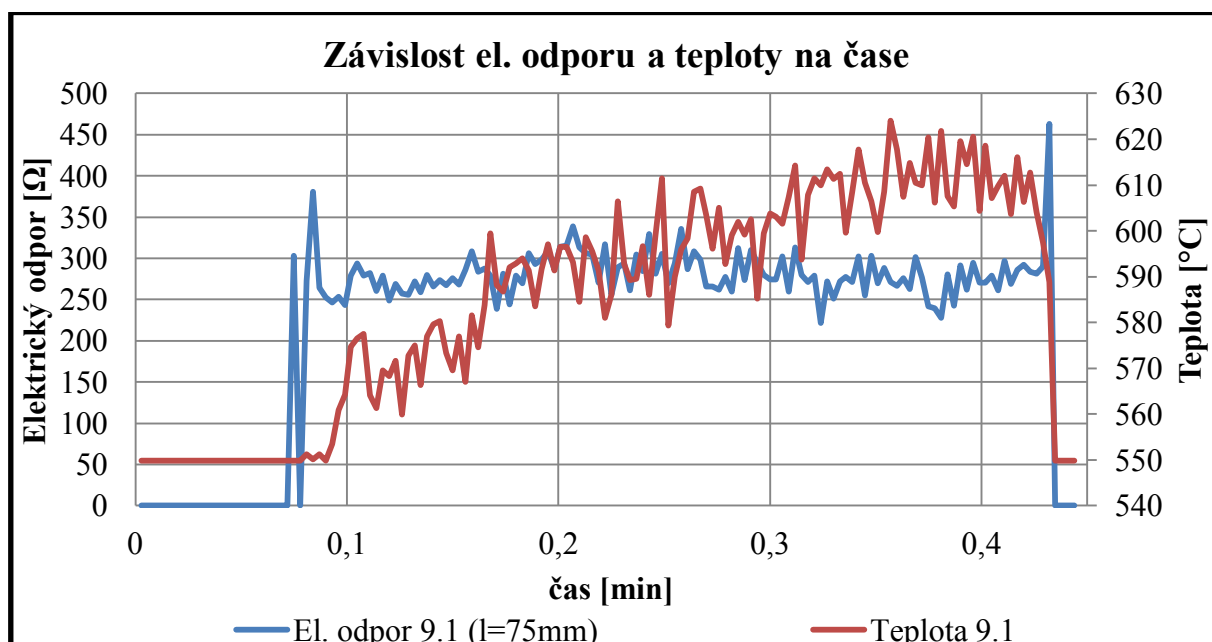


Obr. 8.23. Opotřebení čela a hřbetu při zkouškovém 9. měření (před a po obrábění)

Obrázky vlevo (viz. Obr. 8.23.) ukazují přerušený el. obvod na čele a hřbetu destičky už před měřením. Tento typ opotřebení se nazývá opotřebení hřbetu břitu VB a patří mezi abrazivní formy opotřebení.

Na řezu č. 1 ($l = 75$ mm) je viditelná již nalepená vrstva obráběného materiálu a je vidět mírné zdeformování na hřbetu.

Elektrický odpor



Obr. 8.24. Závislost el. odporu a teploty na čase (měření č. 9)

Obrázek 8.24. ukazuje, že když destička najede do soustruženého materiálu, elektrický obvod se propojí a stále zaznamenává hodnoty odporu podobně jako u obrázku 8.21.

Také stejně jak u 8. měření elektrický odpor na začátku i na konci zapisoval nulovou hodnotu (viz. Obr. 8.24.). Po najetí do řezu (l=75mm) el. odpor vyrostl na 380Ω poté mírně klesl a po dobu soustružení se pohyboval v rozmezí $200\text{--}350\Omega$. Při vyjetí z řezu odpor vystoupal na 420Ω a poté klesl na nulu. Teplota v záběru pomalu rostla s nepravidelným kmitáním.

Při najetí do řezu obrobek nahradil odporovou vrstvu a vznik el. odpor. Celkové opotřebení nástroje bylo již příliš veliké a nalepený materiál už nedokázal překrýt celé opotřebení destičky.

9. Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na sledování elektrického odporu břitové destičky inteligentního nástroje vyrobenou z nitridické řezné keramiky, která měla nanesenou obvodovou vrstvu.

Při obrábění zadaného materiálu (Litina GGG-70) se zaznamenávaly čtyři hodnoty, z kterých se vypracovávaly experimenty. Jednalo se o vibraci, teplotu, míru opotřebení a elektrický odpor. Tato bakalářská práce je zaměřena na sledování elektrického odporu. Kolegové řešili ostatní experimenty.

Proběhlo dohromady devět měření, které měly ověřit, zda můžeme pomocí sledování elektrického odporu hlídat opotřebení destičky, aniž bychom museli vytahovat destičku z upínacího držáku a ověřovat míru opotřebení pod mikroskopem. Provedlo se sedm měření na jedné destičce. Z toho bylo jedno náhradní, protože břit č. 2 se opotřeboval již po prvním řezu. Měření ukázalo, že litina GGG-70 se v průběhu soustružení nalepuje na břitovou destičku. Proto pro ověření nalepování obráběného materiálu na odporovou vrstvu se provedla ještě dvoje zkouškové měření na destičkách, které byly již opotřebované.

Jedná se o široký experiment, který byl vyhodnocován už v minulých letech. U předešlých prací se po dosažení kritéria opotřebení elektrický odpor vždy přerušil.

V této bakalářské práci všech devět měření prokázalo, že uhlík v litině převzal úlohu odporové vrstvy a po najetí do řezu zaznamenával hodnoty el. odporu, i když už míra opotřebení již odporovou vrstvu přerušila.

Pouze v jednom případě ze všech sedmi měření na destičce došlo k tomu, že elektrický obvod byl přerušen. Celková míra opotřebení nástroje u obou zkouškových měření byla již příliš velká na to, aby obráběný materiál svým nalepením překryl celé opotřebení.

Pravděpodobně v onom jedním případě došlo k tomu, že se uhlík nalepený na destičku odloupal a přerušil tak elektrický obvod.

Do doby před experimentem byla inteligentní destička vždy spolehlivá a přestala ukazovat elektrický odpor při přesáhnutí míry opotřebení. Doporučuje se prověřit, z jakého důvodu nespadal el. odpor po dosažení kritéria opotřebení, nebo jestli se opotřebovaný materiál nenaprášil pod destičku, kde uhlík mohl propojit kontakt mezi destičkou a držákem. Tedy prověřit všechny aspekty závislosti odporové vrstvy na míře opotřebení inteligentního keramického nástroje při obrábění litiny GGG-70.

10. Seznam použité literatury

- [1] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích strojů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1053-0.
- [2] VAVERKA, Ivo. *Řezná keramika*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 43 s. doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [3] VÁCLAVEK, J. *Nástroje pro soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 55 s. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [4] PTÁČEK Luděk a kolektiv. *Nauka o Materiálu II*. 2002. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o.
- [5] TRIBOTECHNIKA. *Opotřebení materiálu*. [online]. [cit. 20.4.2014]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/opotrebeni-materialu.html>
- [6] SECOTOOLS. *Opotřebení se nevyhneme*. [online]. [cit. 20.4.2014]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/6/Seco_06.pdf
- [7] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část*. vyd. Ostrava: VŠB-TU Fakulta strojní, 2003.
- [8] BRYCHTA Josef, Čep Robert, NOVÁKOVÁ Jana, PETŘKOVSKÁ Lenka, *Technologie II – 1. díl*. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007, 1. Vydání, 126s, ISBN 978-80-248-1641-8.
- [9] SECOTOOLS. *Proces obrábění kovů – životnost nástrojů*. [online]. [cit.20.4.2014]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/7/Seco_07_bez_inzerce.pdf

- [10] TYRBACH Jaromír, *Eletrický odpor a vodivost, měrný odpor a měrná vodivost*. [online]. [cit.20.4.2014]. Dostupné z:
http://web.telecom.cz/tyrbach/Odpor_a_vodivost.pdf
- [11] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 327 s. ISBN 80-01-01717-6.
- [12] INDIAN JOURNAL OF ENGINEERING & MATERIALS SCIENCES. *An experimental inestigation into the machinabilitz of GGG-70 grade spheroidal graphite cast iron*. [online]. [cit 25.4.2014]. Dostupné z:
[http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/3976/1/IJEMS%2016\(2\)%20116-122.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/3976/1/IJEMS%2016(2)%20116-122.pdf)
- [13] KRATOCHVÍL Jiří. *Metodika sledování opotřebení keramických nástrojů pomocí odporových vrstev během řezu*. Ostrava, 2010. 118s. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava. Školitel: doc. Ing. Vladimír VRBA, CSc.